



HAL
open science

Évaluation de la croissance du pin d'Alep en région méditerranéenne française

M. Vennetier, C. Ripert, F. Brochiéro, Cyrille Rathgeber, O. Chandieux, R. Esteve

► **To cite this version:**

M. Vennetier, C. Ripert, F. Brochiéro, Cyrille Rathgeber, O. Chandieux, et al.. Évaluation de la croissance du pin d'Alep en région méditerranéenne française. *Revue forestière française*, 2010, 2010 (5), 11 p. hal-00593706

HAL Id: hal-00593706

<https://hal.science/hal-00593706>

Submitted on 17 May 2011

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

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

Evaluation de la croissance du pin d'Alep en région méditerranéenne française

Michel Venetier ^{*(1+2)}, Christian Ripert ⁽¹⁾, Fabien Brochiéro ⁽³⁾, Cyrille B.K.Rathgeber ⁽⁴⁾,
Olivier Chandieux ⁽⁵⁾, Roland Estève ⁽¹⁾

* auteur correspondant. michel.venetier@cemagref.fr

(1) Cemagref Aix en Provence, GR Ecosystèmes Méditerranéens et Risques, 3275, route de Cézanne, CS 40061, Aix en Provence cedex 5

(2) ECOREV, Fédération de Recherche CNRS n°3098, Europôle Méditerranéen de l'Arbois, BP 80, 13545 Aix-en-Provence cedex 4

(3) DDAF de l'Hérault, Place Chaptal. 34261 Montpellier cedex 2

(4) INRA, UMR1092, Laboratoire d'étude des ressources forêt-bois (LERFoB), Centre INRA de Nancy, F-54280 Champenoux, France

(5) Alcina (SARL), 2 place Pierre Viala, 34060 Montpellier, FRANCE

Résumé

Cet article présente une clef d'évaluation de la productivité potentielle du pin d'Alep pour la région méditerranéenne française, utilisable même en absence de peuplement. Elle est complétée par l'interprétation des relations entre la croissance du pin d'Alep et les principaux facteurs du milieu. Le bilan hydrique stationnel est déterminant dans cette croissance. Le rôle du climat est complexe en raison des corrélations et interactions entre pluie et température, aucune combinaison optimale de ces deux facteurs pour le pin d'Alep n'étant présente en France. Le pin d'Alep craint les grands gels et la neige. Les meilleures croissances sont obtenues dans les stations à très bon bilan hydrique entre 100 et 300 m d'altitude. Grâce à son exceptionnelle résistance à la sécheresse et à son adaptabilité à tout type de sol, il n'existe quasiment aucune station en région méditerranéenne française en dessous de 700 m où le pin d'Alep ne puisse au moins survivre. Mais le changement climatique pourrait modifier la donne. L'accroissement des déficits hydriques d'origine climatique, qui ne pourraient plus être entièrement compensés par les facteurs stationnels à basse altitude, devrait éliminer le pin d'Alep des plus mauvaises stations et diminuer globalement sa croissance dans une grande partie de son aire actuelle. Les clefs autoécologiques, dont celle présentée dans cet article, devront sans doute être adaptées dans quelques décennies.

Mots clefs: pin d'Alep; forêt méditerranéenne; France; productivité; autécologie; croissance en hauteur; indice de fertilité; changement climatique

Abstract

This article presents a model aiming at the assessment of the potential productivity of *Pinus halepensis* in any environment within the French Mediterranean region, even without existing stand. Local water balance is the key issue for Aleppo pine growth. Climate plays a complex role due to interactions between rainfall and temperature: no optimal combination of these two variables exist in the study area. Aleppo pine fears heavy snow and deep frost. The best productivity is obtained in sites with excellent water balance between 100 and 300 m in elevation. Thanks to its high resistance to drought and adaptability to nearly all types of soil, Aleppo pine can grow or at least survive in about any place in the French Mediterranean region below 700 m. Climate change could change the present balance. Climatic water deficits should no longer be remediated by favorable site conditions, so that Aleppo pine may disappear from the worse sites, and its productivity could decrease in a large proportion of its present distribution area. The tool presented in this paper should probably be updated in a few decades.

Keywords: Aleppo pine; Mediterranean forest; France; productivity; autecology; height growth; fertility index; climate change

1 CONTEXTE ET OBJECTIFS

1.1 *Le pin d'Alep : une espèce commune mais méconnue*

Le pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.) est un des arbres les plus communs dans la partie ouest du bassin méditerranéen, où il occupe environ 3,5 millions d'hectares (Le Houerou, 2005). En France, l'Inventaire forestier national lui attribuait 244 000 ha en 2003 (*Figure 1*) dont 208 000 ha dans la région Provence-Alpes-Côte d'Azur. Cela en fait le deuxième résineux par la surface en région méditerranéenne française, où il domine en dessous de 800 m d'altitude (Loisel, 1976), et le sixième au niveau national.

Malgré cette place importante, il n'avait fait l'objet que de peu d'attention jusqu'en 1970, sans doute à cause de sa faible productivité (Pardé, 1957). A partir de 1970, un regain d'intérêt s'est manifesté sur le plan scientifique (Abbas et al., 1985a; 1985b; Quézel, 1985; Serre, 1976) comme sur le plan technique (Neveux et al., 1986, ONF et CRPF-PACA, 1992). Une première étude de sa croissance en hauteur en plantations a débouché sur un modèle de production fondé sur la croissance et la surface terrière (Couhert et al., 1993). Mais cette étude permettait seulement de mesurer le niveau de productivité, dans une plantation, et pas de l'évaluer à partir des conditions stationnelles en l'absence de peuplement (friche, régénération trop jeune, zone incendiée, ...). D'autre part, il restait à vérifier sa pertinence pour les peuplements naturels de pin d'Alep, majoritairement issus de régénération naturelle, souvent mélangés et inéquiennes.

L'écologie générale du pin d'Alep, sa biogéographie et notamment ses relations avec le climat, ont fait l'objet de quelques publications généralistes ou scientifiques dont peu sont en français (Bariteau, 1992; Devaux et Le Bourhis, 1978, Nicault, 1999; Quézel, 1985; Quézel et Barbéro, 1992; Rathgeber, 2002; Serre, 1976; Serre-Bachet, 1992; Vila, 2008). Curieusement, et peut-être à cause de sa grande plasticité écologique, les conditions locales de sa productivité n'avaient quasiment pas été étudiées en France, et peu ailleurs. Il n'existait que quelques bases générales tirées des publications ci-dessus et une préétude réalisée en 1997 en Provence calcaire (Brochiero et al., 1999 - *Figure 1*).

1.2 *Des méthodes mises à l'épreuve par le changement global*

Nos modèles de productivité ont pour objectif d'estimer la hauteur dominante d'un peuplement en fonction de son âge à partir de facteurs caractéristiques du milieu. Cela suppose que, sur un site donné, la courbe de croissance des arbres qui sert de base au modèle soit invariable pour les générations successives et ne dépendent que de sa fertilité (Duplat et Tran-Ha, 1989). Or les résultats convergents de très nombreuses études en France (Becker et al., 1994; Lebourgeois, 2005) et ailleurs dans le monde (Spiecker et al., 1996) montrent que la vitesse de croissance des arbres, en diamètre comme en hauteur, a varié au cours du XX^e siècle, le plus souvent en marquant une sensible accélération. Le pin d'Alep n'échappe pas à la règle (Vennetier et al., 1999), ce qui nécessite une correction des modèles de croissance (cf. paragraphe 2.4). Par contre, les travaux les plus récents et les expérimentations en cours (Girard et al., 2011 ; Vennetier et al. 2008) indiquent un retournement de cette tendance à la fin des années 90 et au début du XXI^e siècle sous l'effet conjugué de températures très élevées et de sécheresses répétées.

1.3 *Objectifs de l'étude*

Les objectifs de cette étude étaient de mieux connaître les facteurs écologiques déterminants de la croissance en hauteur du pin d'Alep en France, et d'en tirer des clefs autécologiques destinées aux gestionnaires forestiers. Une difficulté particulière était de travailler dans des peuplements irréguliers et inéquiennes, ce qui n'avait jamais été fait auparavant, mais nous permettait d'afficher un objectif supplémentaire : mettre en évidence les variations de croissance du pin d'Alep entre différentes générations sans variation stationnelle, ce qui est plus difficile à réaliser entre peuplements réguliers sur des parcelles séparées.

Les résultats concernant d'une part les variations de croissance du pin d'Alep à court et long terme et, d'autre part, le choix, les modes de calibration et le domaine de validité d'un modèle de croissance en hauteur ont été publiés précédemment soit sur la base du sous-échantillon initial en Provence calcaire

(Brochiéro et al., 1999, Vennetier et al, 1999) soit sur l'échantillon complet de cette étude (Rathgeber et al., 2004). Dans cet article, nous nous focalisons donc sur l'étude de la productivité, en nous appuyant sur ces résultats antérieurs. Ce travail a fait l'objet d'un rapport d'étude (Ripert, et al., 2001), accompagné d'un guide d'utilisation auquel les lecteurs pourront se référer pour plus de détails sur la description et la notation des variables d'environnement utilisées dans les clefs autécologiques. Enfin, un chapitre de thèse lui est consacré (Vennetier, 2007) qui en approfondit les aspects scientifiques, statistiques et méthodologiques.

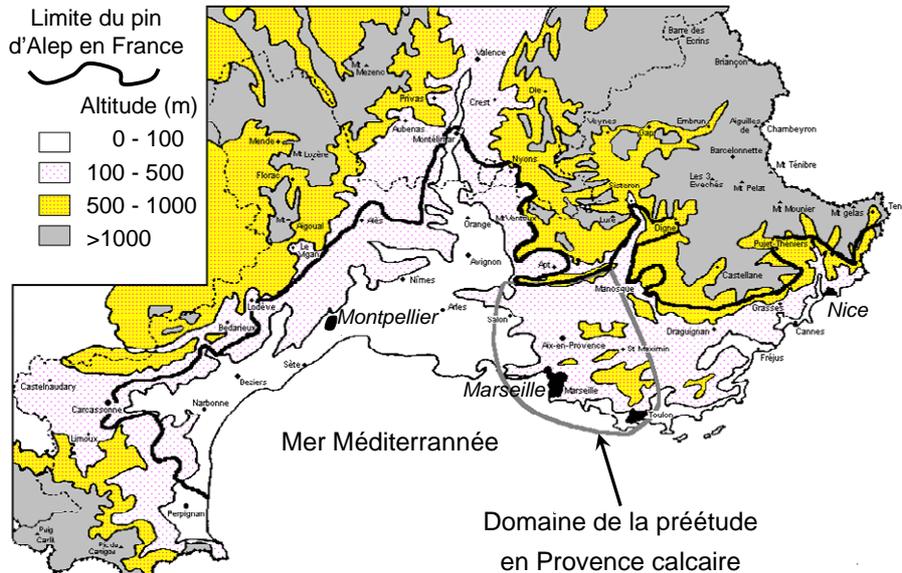


Figure 1 : limite de l'aire de répartition du pin d'Alep en France.

2 MATÉRIEL ET MÉTHODES

2.1 Zone d'étude

Le domaine d'étude est l'aire française du pin d'Alep (Figure 1), entre 42 et 44° de latitude nord, entre 2 et 8° de longitude est, et en dessous de 1000 m d'altitude.

Son climat est typiquement méditerranéen, avec une grande variabilité interannuelle. Il se caractérise par une sécheresse estivale moyenne de 2 à 4 mois combinée avec des températures très élevées, par des hivers frais et humides et par des pics de pluies en automne et au printemps. Les précipitations moyennes annuelles varient de 500 mm sur la côte à 1000 mm sur certains massifs montagneux. Elles sont généralement comprises entre 600 et 750 mm en Basse Provence et en Languedoc-Roussillon et entre 800 et 900 mm dans l'arrière-pays. La température moyenne annuelle varie de 16° C sur la côte au sud-ouest à 9° C sur les crêtes. Elle est actuellement d'environ 13,8° C sur l'aire française du pin d'Alep.

Dans la zone d'étude, le pin d'Alep forme des peuplements souvent irréguliers, parfois pur mais plus fréquemment en mélange avec le chêne vert (*Quercus ilex* L.) ou le chêne pubescent (*Quercus pubescens* Willdenow).

2.2 Plan d'échantillonnage, choix et mesure des arbres

Le plan d'échantillonnage compte 515 placettes, inventoriées entre 1996 et 1998, la densité de placettes étant proportionnelle aux surfaces couvertes par le pin d'Alep dans chaque département (Tableau 1). La placette standard est un cercle de 400 m² minimum. Mais des placettes de forme rectangulaire y ont été utilisées pour garantir leur homogénéité dans les milieux linéaires comme les crêtes et thalwegs.

Alpes Hte Prov	32	Provence Alpes Côte d'Azur 424
Alpes Maritime	20	
Bouches du Rhône	168	
Var	129	
Vaucluse	75	
Aude	20	Languedoc Roussillon 73
Gard	21	
Hérault	28	
Pyrénées Orientales	4	
Drôme	15	Rhône Alpes 15

L'échantillon couvre de façon homogène les principaux gradients écologiques de la zone d'étude :

- à une échelle globale, les différents types de sols et de matériau parental et les gradients de continentalité, d'altitude (0-1000 m) et de climat (combinaisons pluie/température).

- à une échelle locale, gradients d'exposition, de pente, de topographie et de profondeur de sol.

Afin de limiter l'effet des perturbations, nous n'avons retenu que des sites peu touchés par des activités humaines récentes (pas d'exploitation forestière depuis 30 ans, pas de pâturage, ni de culture, ni de débroussaillage), assez

loin de zones urbaines pour limiter le piétinement, et n'ayant pas subi d'incendie destructeur depuis l'installation des arbres dominants, ni de feu courant depuis au moins 30 ans.

Enfin, nous avons veillé à ce que les placettes représentant chaque combinaison des variables principales soient réparties de façon homogène dans la zone d'étude.

Pour les mesures sur les pins, nous n'avons choisi que des arbres sains, les plus hauts du peuplement quand il n'y avait qu'une génération, et les plus hauts de leur génération quand plusieurs générations étaient présentes sur une même placette. Cinq arbres si possible ont été choisis par placettes, jusqu'à 7 en cas de générations multiples. L'âge a été mesuré soit par sondage au cœur à la tarière de Pressler (deux carottes en croix à 1,3 m et une au pied au niveau du sol), soit sur souche après abattage en cas d'analyse de tige. 2158 couples âge / hauteur totale ont été mesurés sur des arbres de plus de 35 ans (35 à 180 ans, moyenne 70 ans). Les arbres plus jeunes (180 individus) n'ont pas été retenus dans cette étude (cf. fig. 2).

Les courbes de croissance en hauteur du pin d'Alep ont été reconstituées précisément par analyse de tige sur 113 individus répartis dans l'ensemble de la zone d'étude.

2.3 Variables du milieu utilisées

La description, le code et les modalités des variables retenues dans les clefs figurent dans le *Tableau 2*. On utilise :

- d'une part des facteurs qui peuvent être cartographiés et mesurés sur carte ou SIG : variables climatiques et géographiques, et topographie à l'échelle du paysage. Pour les variables climatiques nous disposons de 142 postes météorologiques Météo-France avec des séries complètes sur la période 1961-96, et de 23 postes complémentaires (stations agricoles, scientifiques ou privées) sur des durées plus courtes mais situés au cœur des massifs et en altitude donc permettant de préciser certains gradients. Ces données ont été interpolées sur l'ensemble du territoire au pas de 50 m après optimisation d'un modèle adapté.

D'autre part des variables qui sont relevées localement : topographie à l'échelle de la station, pente, exposition, géologie (type de roche, pendage et fissuration pour les roches dures, stratification, ...), et sol (description physique des différents horizons et matériaux du sol). S'y ajoutent la teneur en calcaire dans la terre fine et une variable décrivant l'action anthropique notamment la présence d'anciennes terrasses ou les traces anciennes de cultures (billons, épierrage, murets, ...) qui modifient la topographie locale et la fertilité.

Une fosse pédologique a été ouverte sur chaque placette aussi profondément (20 - 150 cm) que le permettaient les moyens, en général manuels, de l'étude, complétée par au minimum 5 sondages à la tarière.

2.4 Modèle de croissance en hauteur et calcul des indices de fertilité

Nous avons retenu un modèle de type Chapman-Richards, déjà proposé pour la Provence calcaire (Brochiéro et al., 1999 et qui s'est révélé statistiquement le plus performant sur la zone d'étude (Vennetier 2007). Sa formule, optimisée pour nos données, est précisée dans l'équation ci-dessous et dessine les courbes de croissance en hauteur de la *Figure 2*.

$$H70_i(\text{estimé}) = h_i * \left[\frac{1 - \exp(-0,021 * 70)}{1 - \exp(-0,021 * \text{âge}_i)} \right]^{1,5385}$$

* $H70_i$: indice de fertilité pour l'arbre i = hauteur estimée à 70 ans,

* h_i et âge_i : hauteur et âge actuels de l'arbre i mesuré,

* 70 : âge de référence,

* -0.021 et 1.5385 : paramètres généraux d'ajustement du modèle aux courbes de croissance.

Les indices de fertilité par arbre (hauteur d'un arbre à un âge de référence donné) ont été calculés pour un âge de 70 ans. C'est à la fois l'âge moyen des arbres de notre échantillon, et l'âge d'exploitabilité dans les plantations de la zone d'étude sur sol moyens à bons (Couhert et Duplat., 1993). L'indice de fertilité d'une placette est obtenu en moyennant les indices des arbres de cette placette.

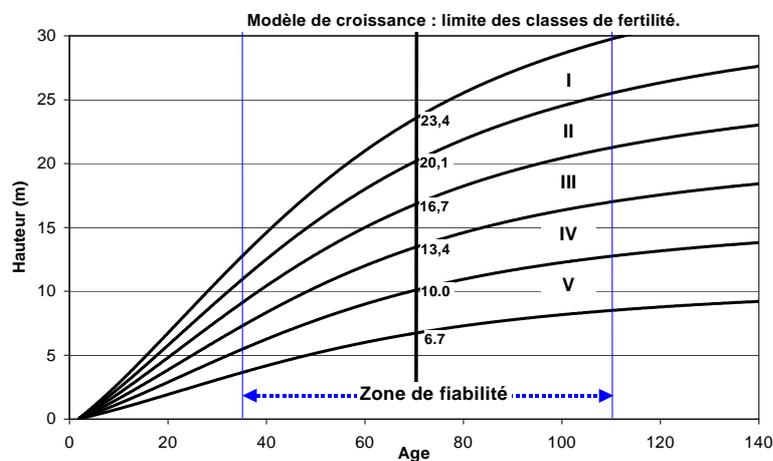


Figure 2 : limites de classes de fertilité pour le pin d'Alep en France. La zone de fiabilité correspond à la plage d'âge où l'erreur moyenne sur la prédiction de l'indice de fertilité à partir de données d'analyse de tige ne dépasse pas 10%. L'âge est compté depuis le sol.

Nous avons choisi de faire 5 classes de fertilité qui partagent de façon homogène le domaine de variation des croissances observées (*Figure 2*). L'amplitude d'une classe est de 3,15 m pour l'indice H70. Cet indice a été calculé pour chacun des 2158 couples âge-hauteur.

Nous avons calculé l'accélération de vitesse de croissance du pin d'Alep au cours du XX^e siècle en utilisant les différences d'âge entre arbres au sein des placettes, où le milieu est homogène et la fertilité constante (cf. Vennetier et al., 1999). Dans le détail, elle dépend de trois facteurs:

1 - Elle est calculée comme le ratio entre d'une part la différence entre le H70 d'un arbre et le H70 moyen de sa placette et d'autre part la différence entre l'âge de l'arbre et l'âge moyen de sa placette. Sur l'échantillon complet, l'accélération moyenne au cours du XX^e siècle est de 4,1 cm/an.

2 - Cette accélération est d'autant plus faible que les arbres sont en moyenne vieux, avec trois classes d'âge : toutes fertilités confondues, elle atteint 6,5 cm/an à 35 ans; perd 0.8 cm/an par décennie de 35 à 70 ans, 0.3 cm/an par décennie entre 70 et 110 ans puis se stabilise à un niveau faible (2,5 cm/an) au-delà de 110 ans.

3 - Elle est d'autant plus forte que la station est fertile : tous âges confondus, elle est stable et faible (2,2 cm/an) en dessous de 12 m, gagne environ 1 cm/an par mètre de H70 de 12 à 20 m puis se stabilise autour de 12.2 cm/an au-delà de 22 m.

La correction pour chaque arbre a tenu compte des trois facteurs et a été calculée par une régression PLS (Partial Least Square) qui leur donne respectivement les poids relatifs suivants: 41,8% ; 30,1% et 28,1%.

Tableau 2 : Description des variables et leur transformation d'après l'analyse en réseaux de neurones

Variable	Transformation	Description	min - moy - max (médiane si distribution excentrée) de la variable non transformée, ou classes, et commentaires
Altitude (m)	Symétrisation ⁽¹⁾ et bornage ⁽²⁾ haut		2 - 350 - 990 m en PACA. 30 - 140 - 330 m en Languedoc Roussillon. Réponse à l'altitude décroissante de part et d'autre d'un optimum situé à 200 m. Se stabilise au-dessus de 800 m où le nombre de placette est très réduit.
Pluie moyenne sans l'été(mm)	Bornage ⁽²⁾ haut	Pluie moyenne annuelle sans l'été (juin à août)	sans l'été: 385 - 650 - 1120 mm. Moyenne annuelle avec l'été 450 - 765 - 1300 mm. Réponse à la pluie moyenne assez linéaire mais plafonne au dessus de 950mm
Pluie d'été (mm)	Bornage ⁽²⁾ haut	Pluies cumulées des mois de juin à août.	50 - 112 - 190 mm La réponse à la pluie d'été est assez linéaire mais plafonne au dessus de 125 mm
Température (°C) moyenne annuelle	Symétrisation ⁽¹⁾		9.3 - 13 - 16°C (13,2°C). 13.8°C constitue l'optimum dans la zone d'étude. La réponse décroît linéairement de part et d'autre.
Epaisseur colluvion (cm)	double bornage ⁽²⁾ + log		0 - 50 - 500 cm (22 cm). 50% des relevés sur altérite (colluvion < 25 cm). Les classes 50-100;100-150 et >150 représentent chacune 11%, la classe 25-50 = 17%. Deux seuils: bas=25 cm et haut=100 cm. Réponse logarithmique entre ces 2 seuils.
Profondeur totale du sol (cm)	Bornage ⁽²⁾ haut + log	Horizons densément prospectés par racines.	10 - 90 - 500 cm (80 cm). Les classes <50; 50-99; 100-149 et ≥ 150 représentent respectivement 21, 37, 26 et 16%. Un seuil haut (120 cm), réponse logarithmique jusqu'à ce seuil.
Topographie générale	sans	Position dans le relief en 5 classes	vallon vallée (5), bas de pente(4), plaine plateau (3), pentes et replats (2), sommet, croupe, haut de pente (1)
Topographie transversale	Sans	Topographie suivant courbes de niveaux.	Variable en 3 classes: concave (1), neutre (0), convexe (-1).
Réserve Utile (mm/m)	Exponentielle	Réserve liée à la texture (cf. annexe 1)	70 - 157 - 200 (175). 50% des sols sont dominés par limons et argiles (RU>170). 2 autres classes dominantes: limons ou argile sableux (130<RU<155) 33%, sables limoneux (RU~105) 11%. Sables purs rares (RU~70) 5%.
Pendage stationnel	sans	Variable en 5 classes de -2 à +2 (cf. annexe 1)	Combinaison des pendages parallèle et perpendiculaire aux courbes de niveau en trois classes chacun: conforme = parallèle au sol (-1), intermédiaire (0); favorable = incliné (1)
Pente (degrés)	sans		0 - 15 - 40 degrés. Les classes 0; 1-5; 5-10; 10-15; 15-20; 20-25; >25 sont toutes également représentées (~15%) N'est significative que sur les roches fluides carbonatées.
Affleurements rocheux (%)	sans	Affleurements de roche non ou très peu altérée.	60% des sols ne présentent pas d'affleurements rocheux. Les classes 1-10%, 10-30% et >30% représentent respectivement 25, 10 et 5% des placettes. A ne pas confondre avec les affleurements de cailloux.
Affleurements de cailloux (%)	Sans	Cailloux posés en surface sous la litière.	Eléments libres, hors affleurements rocheux, n'appartenant pas à l'altérite en place (ils ne sont pas imbriqués). Les classes 0%, 1-10%, 10-30% et >30% représentent respectivement 9, 34, 26 et 31% des placettes.
Fissuration des bancs de roches	Sans	Variable en 4 classes, de 0 à 3	Les diaclases perpendiculaires aux bancs de roches sont significatives. Ne s'applique qu'aux roches dures. 0 = aucune rupture, 1 = de 1 à 5/m ; 2 = de 6 à 15/m ; 3 = 16 et plus/m
Pourcentage d'éléments grossiers	Sans	Roche, cailloux, graviers non altérés dans le sol	Sur roches fluides, c'est le pourcentage de roche mère non altérée sur l'épaisseur considérée comme profondeur de sol.
Calcaire dans la terre fine	sans	Réaction à HCl de la terre fine tamisée à 1mm	0 = aucune réaction à l'acide, 1 = réaction à peine perceptible, 2 = réaction nette mais modérée ou localisée, 3 = réaction forte et généralisée.

⁽¹⁾ La symétrisation consiste à considérer non pas la valeur de la variable mais la différence entre cette valeur et un seuil se situant dans la plage de données. La variable transformée croît ou décroît de façon symétrique de part et d'autre de ce seuil, constituant un minimum ou un optimum.

⁽²⁾ Le bornage consiste à considérer qu'en dessous (bornage bas) ou au dessus (bornage haut) d'un seuil donné, la variable prend une valeur constante.

2.5 Analyses statistiques et validation des modèles de productivité

Nous disposons d'un nombre élevé de variables de milieu (près de 70 au départ), pour certaines fortement corrélées: nous avons donc choisi et comparé deux méthodes adaptées à ces contraintes : les arbres de décision et la régression PLS (Partial Least Square). D'autre part, certaines variables peuvent avoir à l'état brut des relations non-linéaires avec l'indice de fertilité, alors que la régression PLS n'est optimale que pour des relations linéaires. Nous avons donc utilisé les réseaux de neurones pour tester la forme de réponse de l'indice de fertilité à ces variables, et les avons si nécessaire transformées.

Pour le détail de ces méthodes statistiques, des tests de robustesse et de la validation des modèles, se reporter à Vennetier (2007).

3 RESULTATS

3.1 Modèle en arbre de décision

Le modèle en arbre de décision peut se résumer dans la *Figure 3*.

Ce modèle butte sur le faible nombre de placettes par branche au-delà de 4 ou 5 niveaux hiérarchiques. Mais de nombreux autres facteurs doivent être pris en compte pour une meilleure prédiction des indices. Comme il n'est pas possible de les intégrer directement dans l'arbre de décision, nous les avons regroupés dans des tableaux complémentaires. Trois corrections doivent être appliquées : un calcul basé sur un tableau de facteurs de compensation, une correction éventuelle en cas de roches fluides carbonatées et une correction finale basées sur la synergie entre facteurs.

En se basant sur les résultats du modèle en régression PLS, nous avons affecté un poids relatif à chaque variable. Ce poids a été traduit pour chaque classe de chaque variable par une valeur qui varie entre +2 et -2 (variables ou modalités fortes) ou entre +1 et -1 (variables ou modalités faibles). En faisant la somme des valeurs de tous les facteurs du tableau de compensation, on obtient un indice qui permet de savoir si l'on se trouve dans la fourchette supérieure, moyenne ou inférieure de l'intervalle de confiance de chaque branche de l'arbre. Le calcul pour obtenir la correction se trouve sous le tableau dans la *figure 3*.

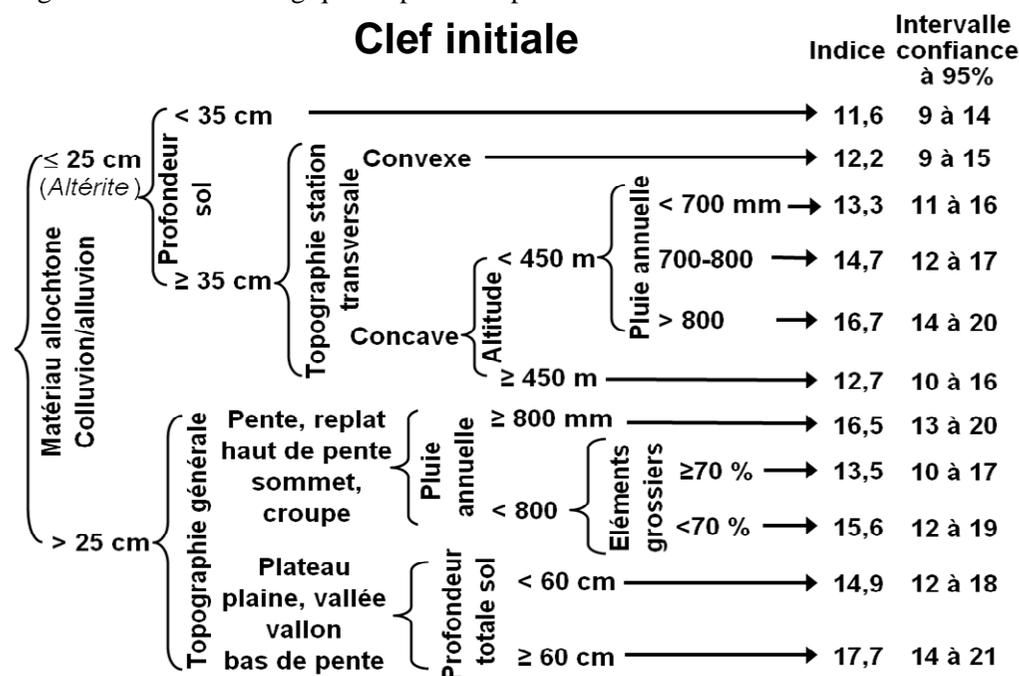
Avec l'arbre de décision seul, le résidu moyen des prédictions par rapport aux valeurs observées est de 1,6 m (mode 0,4; Ecart type = 1,1). Dix résidus sont supérieurs à 4 m et 35 à 3,45 m soit une classe de fertilité. Il y a donc un groupe de placettes très mal prédites.

Avec les facteurs de compensation, le résidu moyen tombe à 1,25 m avec cependant encore 6 valeurs supérieures à 4 m et 22 valeurs supérieures à 3,4 m. Il existe donc des placettes dont l'indice de fertilité observé semble incompatible avec les facteurs du milieu qui peuvent être observés ou mesurés. L'élimination des 5% de placettes les plus mal prédites diminue de 0,2 m la moyenne des résidus mais ne change pas la structure de l'arbre de décision.

On note que ces placettes problématiques se situent essentiellement sur roches fluides carbonatées (marnes ou argilites), et que leurs indices de fertilité sont presque toujours surestimés. Mais l'arbre de décision ne permet pas de variante spécifique pour ces roches en raison d'un nombre trop faible de placettes (40). Elles ont été traitées séparément en régression PLS. Elles posent des problèmes nutritionnels et physiques particuliers à la croissance des arbres et des problèmes d'évaluation de certaines variables. Ces particularités sont détaillées dans la discussion. De façon pratique, les zones de roches fluides non altérées doivent être considérées comme impénétrables par les racines. Leur présence réduit l'indice de fertilité d'une classe en absence d'une colluvion de moins de 25 cm.

Cet effet s'estompe progressivement et linéairement avec la profondeur de la colluvion pour disparaître au-delà de 80 cm. Cette correction validée par le modèle PLS est proposée sous la clef.

Figure 3 : Clef autécologique du pin d'Alep fondée sur le modèle en arbre de décision. La clef s'utilise en 2 à 4 étapes suivant les conditions de milieu



Correction sur roches fluides carbonatées (RFC = marnes et argilites)

La correction tient compte de l'épaisseur de la colluvion de surface = Y (m)
 RFC non altérée: correction = - 3 m + 4 Y (ne compter Y qu'à partir de 0.30 m)
 RFC fortement et profondément (>80 cm) altérée: ajouter 2 m

Correction pour synergie sur les meilleures et plus mauvaise stations

* Lorsque plus de 3 variables présentent une compensation très favorable sans variables présentant une classe très défavorable, ou lorsqu'aucune variable ne présente de compensation défavorable, l'indice de fertilité est augmenté de 20%.

* Lorsque plus de 3 variables présentent une compensation très défavorable sans variables présentant une classe très favorable, ou lorsqu'aucune variable ne présente de compensation favorable, l'indice de fertilité est diminué de 20%.

Mode d'emploi

* 2 étapes obligatoires: clef initiale + facteurs de compensation (balance)

* 2 étapes complémentaires si pertinentes: roches fluides et synergie

Facteurs de compensation

Modalités		Modalités	
-	Défavorables	Favorables	+
--	Très défavorables	Très favorables	++

Climat			
Pluie d'été	-	< 85	>100 +
Pluie moy annuelle	-	<700	>800 +
Altitude	-	>450	
	--	>600	200 à 300 +

Relief			
Topo générale	-	pente et replat	vallon, vallée ++
	--	sommet croupe	bas de pente +
	--	haut de pente	
Topo stationnelle	-	transvers convexe	transvers concave +
Terrasses			présence ++

Surface du sol			
Affleurements rocheux	-	> 10%	
	--	> 30%	
Affleur ¹ cailloux	-	> 30%	< 10% +

Roche			
Pendage station	-	parallèle/conforme	rentrant et oblique +
Diaclases	-	pas ou peu, étroites	nombreuses et larges +
Débit de l'altérite	-	Graviers cailloux	toutes dimensions +
	--	plaquettes	pierres blocs +

Sol			
Texture	-	SL, SI, Sa, L, A	SLA ++
	--	S	La ou LA +
Profondeur totale	-	35 à 75	> 180 ++
	--	< 35 cm	90 à 180 +
% d'éléments grossiers	-	60 à 95 %	1 à 20 % ++
	--	> 95 %	20 à 40 % +

nombre -	nombre +
----------	----------

Balance = (nombre +) - (nombre -)

Balance	Correction	Balance	Correction
≤ - 8	- 3 m	≥ 8	+ 3 m
- 5 à - 7	- 2 m	+ 5 à + 7	+ 2 m
- 2 à - 4	- 1 m	+ 2 à + 4	+ 1 m

Après l'ensemble de ces corrections, le modèle peine encore à prédire les valeurs les plus faibles de l'indice de fertilité, qu'il surestime, et ses valeurs les plus fortes qu'il sous-estime. On peut interpréter cette difficulté comme l'impossibilité d'intégrer directement dans ces modèles les synergies positives ou négatives entre variables. L'effet conjugué de variables très majoritairement favorables ou défavorable est supérieur à la somme de leurs effets individuels, et conduit à ajouter ou retrancher 20% au H70 obtenu après les corrections précédentes, comme proposé sous la clef.

La combinaison de l'arbre de décision et des facteurs de compensation forme un modèle hybride, combinant l'approche par segmentation et une approche par système expert. Utilisant des variables non transformées, il est directement opérationnel pour les gestionnaires et simple d'utilisation.

3.2 Modèle PLS

Le calcul du modèle PLS a montré la complexité de la réponse du pin d'Alep aux variables du milieu, avec des effets non-linéaires : courbes sigmoïdes, exponentielles en cloches, effets de seuils (tableau 2). Sans ces transformations, peu de variables sont significatives. Il a aussi aidé à quantifier et comprendre la réponse spécifique du pin d'Alep sur roches fluides carbonatées qui sont traitées séparément (cf. correction proposée au paragraphe précédent). Comme en dehors de ces dernières, ce modèle donne des résultats très proches de ceux de l'arbre de décision, il n'est pas présenté ici. On pourra se référer aux travaux antérieurs (Ripert et al. 2001, Vennetier 2007) où il est détaillé et décliné sous une forme opérationnelle à l'usage des forestiers de terrain, qui peut être utile en complément du modèle de cet article. La compensation pour les effets synergiques dans les milieux les plus favorables ou défavorables s'appliquent aussi à ce modèle.

4 DISCUSSION

4.1 Limites de validité des courbes de croissance et du calcul des indices

La croissance initiale des pins est particulièrement variable sur les roches carbonatées dures ou fluides, et plus globalement sur les altérites de roches dures, indépendamment de la potentialité du site : elle empêche la détermination fiable d'un indice de fertilité à partir du couple hauteur-âges de pins de moins de 35 ans. Elle peut conduire à des différences importantes entre l'indice potentiel des sites déterminé par les clefs autécologiques et la hauteur de très jeunes peuplements. Cette imprécision initiale peut être attribuée à deux causes :

✧ la plus ou moins grande difficulté pour développer initialement le système racinaire dans des milieux généralement caillouteux et rocheux, très variables à l'échelle métrique, et dans des roches dont l'altération et la fissuration sont irrégulières.

✧ la concurrence rencontrée dans le jeune âge par les semis de pins avec les autres végétaux.

Les ligneux peuvent avoir une influence favorable s'ils forment un abri latéral ou très défavorable s'ils dominent les semis (Elhamrouni et Sarson, 1975; Abbas et al., 1984; d'Hanens, 1997). Ce dernier auteur et nos observations montrent aussi que la relation de facilitation ou concurrence entre ligneux préétablis et jeunes pins dépend de l'espèce : à densité et couvert comparables, le chêne kermès est plus défavorable que le chêne pubescent, lui-même plus défavorable que le chêne vert. Dans les zones agricoles ou pastorales abandonnées et dans certaines coupes forestières, les herbacées denses limitent l'installation puis la croissance de jeunes pins (Achenar 1984; d'Hanens, 1997).

4.2 Les facteurs déterminants de la productivité du pin d'Alep

A l'intérieur de la zone méditerranéenne française et en dessous de 600 m d'altitude, le pin d'Alep, s'il présente des variations fortes de croissance liées à ses exigences écologiques, ne rencontre quasiment aucune contrainte rédhibitoire. Il s'adapte plus ou moins bien à tous les types de stations, à l'exception des sols à hydromorphie proche de la surface dont il est exclu. Il permet de valoriser, ou au moins d'occuper forestièrement, des situations difficiles où peu d'autres essences s'adaptent.

Les principaux facteurs influençant la croissance du pin d'Alep sont liés au bilan hydrique stationnel, le bilan trophique étant marginal. Les conditions favorables sont principalement :

- ✧ en topographie générale, les vallées et thalwegs principalement, les plaines et plateaux secondairement ;
- ✧ une bonne profondeur du sol et des matériaux d'origine colluviale ;
- ✧ une texture équilibrée ou au moins mixte ;
- ✧ une topographie stationnelle concave ;
- ✧ des traces d'activités agricoles passées, notamment les terrasses ;
- ✧ une faible charge en éléments grossiers et en cailloux superficiels et peu d'affleurements rocheux ;
- ✧ une terre fine pauvre en calcaire.

4.2.1 Facteurs édaphiques et topographiques

Il est surprenant de constater à quel point l'effet des matériaux colluviaux (ou alluviaux récents) est favorable lorsque leur épaisseur dépasse 25 cm. D'une part, ces matériaux traduisent généralement des positions topographiques favorables et une érosion limitée: les colluvions s'accumulent là où l'eau se concentre ou s'infiltré. De plus, les matériaux colluviaux ont une structure et une organisation physique plus favorables que les altérites en place : ils ont été brassés et sont donc moins compacts, et les éléments grossiers n'y présentent plus d'imbrication, cette dernière freinant la pénétration racinaire. Enfin les matériaux colluviaux, surtout s'ils sont originaires d'autres types de roches, masquent partiellement les facteurs défavorables spécifiques des roches fluides carbonatées.

Les activités agricoles passées (terrasses, épierrage, murets, billons de labour) ont transformé de façon durable le milieu. Ces ouvrages coupent la pente, limitent l'érosion, favorisent l'infiltration et l'accumulation de matériaux. Ils peuvent influencer la fertilité du milieu sur plus de mille ans (Dupouey et al., 2005). La présence de terrasses accroît de 2 à 3 m l'indice de fertilité pour le pin d'Alep, indépendamment des facteurs descriptifs du milieu pris en compte par ailleurs.

Les textures équilibrées (Sable + Limon + Argile = SLA) favorisent la croissance du pin d'Alep. En présence d'activité biologique et de matière organique, ceux-ci nous sont apparus systématiquement plus structurés et moins compacts que leurs homologues à textures non équilibrées. Par rapport à un sol largement dominé par des argiles ou limons, on gagne une demi-classe de fertilité à autres facteurs constants.

Bien que très tolérant au calcaire, le pin d'Alep pousse mieux sur les sols pauvres en calcaire dans la terre fine, qu'il s'agisse de roches initialement pauvres en carbonate de calcium (y compris roches acides) ou de sols partiellement décarbonatés. Les indices de fertilité sont ainsi plus élevés en moyenne en Provence siliceuse (Maures, Esterel, îles d'Hyères) ou dans certaines parties du Languedoc que sur les zones calcaires à station et climat équivalents. En Provence calcaire, les sols décarbonatés sont indicateurs d'une relative ancienneté, et dans le contexte méditerranéen français le signe d'une dégradation et d'une érosion relativement limitées (Aubert, 2002; Bonneau et al., 1979).

Le fait que les facteurs géologiques ressortent dans les modèles montre que le pin d'Alep exploite profondément les ressources des roches sous-jacentes. Sur les roches dures qui dominent largement dans l'aire française du pin d'Alep, la fissuration et le pendage des bancs jouent un rôle essentiel. Les diaclases verticales, qui permettent le passage des racines vers les horizons profonds, sont plus favorables que les fissurations horizontales, même si ces dernières augmentent le volume prospectable par les racines à l'intérieur des bancs de roche. Un pendage incliné est favorable car il offre aux racines et à l'eau des plans obliques de pénétration en profondeur, et favorise l'infiltration de l'eau en surface. Les marnes et les argilites donnent naissance à des milieux particuliers dont la fertilité pour le pin d'Alep, comme pour les autres végétaux, est très difficile à évaluer. Les cas extrêmes et bien connus sont les "badlands", zones érodées sur roche fluide affleurante, où très peu d'espèces végétales arrivent

à s'implanter et à survivre. Les contraintes exercées sur la végétation par ces roches sont de plusieurs natures:

- contrainte chimique, avec des teneurs en calcaire dans la terre fine qui peuvent être très élevées ;
- contraintes mécaniques, avec une forte compacité et des phénomènes de rétraction/gonflement avec les variations de teneur en eau.
- contrainte hydrique, avec une tendance à se dessécher profondément par évaporation en période sèche et à s'engorger et devenir asphyxiant en surface lors des épisodes pluvieux, une imperméabilité partielle qui empêche l'eau de pénétrer en profondeur lors des épisodes de pluies violentes caractéristiques du climat méditerranéen, et une très forte capacité de rétention de l'eau, qui freine l'absorption de l'eau par les plantes. Alors que la pente n'a que peu d'influence en général sur l'indice de fertilité du pin d'Alep, les roches fluides carbonatées font exception. Le ruissellement y est fortement corrélé à la pente en raison de l'imperméabilité du substrat, réduisant le bilan hydrique. Un sol profond a du mal à se former sans être érodé au fur et à mesure dans les pentes fortes. Au-delà de 20° la contrainte est significative, et au-delà de 30° les indices sont presque toujours très mauvais.

4.2.2 Facteurs climatiques

Les différents seuils et limites des variables climatiques ne sont pas indépendants. Au sein des sous-ensembles géographiques (Languedoc-Roussillon, Provence et Côte d'Azur), l'accroissement de la pluie, favorable à la croissance du pin d'Alep (Serre-Bachet, 1992; Vila et al., 2008), est très lié à l'altitude et à la continentalité. Il est presque entièrement compensé par les diminutions concomitantes de la température moyenne annuelle et de la longueur de saison de végétation qui lui sont néfastes. C'est le long du gradient est-ouest, où la pluviométrie varie pour des niveaux de température équivalents, que l'on peut voir le rôle positif de la pluie. Globalement, et quel que soit le type de sol et de topographie, la fertilité apparaît meilleure dans l'Est du Var et sur la côte d'Azur qu'en Provence, grâce à une pluviométrie supérieure à température égale. Il n'existe en fait pas dans la région méditerranéenne française de zone qui combine l'optimum pour les pluies et les températures.

Le seuil des 500 ou 600 m d'altitude suivant les versants (exposés respectivement au nord et au sud) correspond à une température annuelle de 11° C qui semble être une limite pour la croissance rapide du pin d'Alep. Dans l'étage supérieur, il entre en concurrence avec d'autres espèces mieux adaptées au froid (chêne pubescent, pin sylvestre, ...) qui limitent son extension et le cantonnent sur les sols superficiels en versant sud. L'exposition a un rôle inverse entre zones côtières et arrière-pays : cette inversion s'explique par le caractère limitant des hautes températures et de la sécheresse près de la côte, où le pin d'Alep est favorisé par le caractère frais des versants nord, et au contraire des températures basses limitantes dans l'arrière pays, où le pin d'Alep est plus performant sur les versants sud plus chauds.

Les vallons et vallées en particulier, et toutes les situations où le bilan hydrique local est très favorable, ont des indices de fertilité d'autant plus élevés que la disponibilité de l'eau peut être valorisée par une longue saison de végétation, donc des températures moyennes assez élevées. C'est pourquoi on trouve les meilleures classes de fertilité dans les vallons à des altitudes comprises entre 100 et 300 m.

Lors de la recherche d'arbres âgés pour les analyses de tiges, il a été très difficile de trouver des arbres sans grave accident de croissance dans la partie nord de l'aire (vallée du Rhône) et au-dessus de 600m d'altitude. Les dégâts provoqués en Provence en 2001 et 2008 par des chutes de neige exceptionnelles (bris généralisés de cime et de branches) montrent la sensibilité de cette espèce. Ces dégâts sont toujours suivis par un très net ralentissement de la croissance en diamètre et du développement du houppier. C'est parmi les plus cassés en 2001 que l'on trouve la quasi-totalité des arbres morts des suites de la canicule de 2003.

Les grands gels sont enfin un des principaux facteurs limitants. Ceux de 1929, 1956 et 1985 étaient marqués dans quasiment tous les arbres étudiés par un à plusieurs cernes successifs très étroits et parfois manquants. Celui de 1956 a provoqué assez de mortalité pour qu'une génération de pin établie entre 1957 et 1959 soit présente par bouquets dans de nombreuses placettes. Bien que cela n'apparaisse pas dans les modèles en raison de la rareté de ces événements et du manque de données météo en altitude, ces gels expliquent, avec la neige, les limites actuelles de l'espèce vers le nord et en altitude (Devaux et Le Bourhis, 1978).

4.3 *Adaptation au changement climatique*

Le changement global a conduit au cours du XX^e siècle à une accélération rapide de la croissance en hauteur du pin d'Alep. La hauteur moyenne des pinèdes provençales à 70 ans a gagné près de 30% en un siècle. Cette accélération a dû être prise en compte pour la détermination de l'indice de fertilité du pin d'Alep sur chacune de nos placettes. Elle montre que la notion de fertilité des stations forestière est très évolutive dans le contexte actuel. Le froid étant un facteur limitant de la croissance du pin d'Alep, le réchauffement du climat à pluie constante est sans doute un des facteurs déterminants de cette accélération. L'allongement de la saison de végétation - près de 15 jours sur les dernières décennies (Morin et Chuine, 2007) - permet un démarrage plus précoce de la croissance, au moment où l'eau est abondante, et un polycyclisme tardif prolongeant la croissance en hauteur jusqu'en début d'hiver (Girard et al., 2010). L'amélioration des sols laissés au repos et gagnés par la forêt, après des siècles ou des millénaires de dégradation et surexploitation, contribue sans doute aussi à cette accélération.

Le changement climatique attendu au XXI^e siècle pourrait changer l'équilibre de ces facteurs : dans le contexte actuel, le pin d'Alep y est dans la partie supérieure de son aire globale de répartition. Les pires conditions de chaleur et sécheresse qu'il y trouve sont loin de ses limites potentielles qui sont proches au Maghreb de 350 mm/an et 7 mois de saison sèche avec des températures moyennes annuelles de plus de 19°C. On note cependant que les conditions régnant sur la côte de Provence et du Languedoc à basse altitude sont déjà au-delà de son optimum. De plus, l'épisode de canicule de 2003 et les conditions de température et sécheresse qui ont régné en Provence de 1998 à 2008 ont largement réduit la croissance et dégradé l'état sanitaire du pin d'Alep (Vennetier et al., 2008, Girard et al., 2010) montrant que l'on avait passé une limite critique. Le climat pourrait, dans le futur, gagner du poids dans les modèles.

Dans ces conditions, deux types de stations risquent d'être négativement affectés :

✧ celles où le bilan hydrique local est le plus défavorable, sur zones rocheuses peu fissurées ou sur roches fluides peu altérées (badlands), où la survie des arbres n'est plus assurée en cas de canicule ou de sécheresse prolongée. Ces sites ont montré les plus fortes mortalités depuis 2003, même en absence de casse de neige ou d'autres accidents préalables.

✧ et paradoxalement celles où le bilan hydrique et thermique est le plus favorable comme les fonds de vallon ou les sols profonds sur versants frais en absence de nappe permanente. En effet, la compensation des déficits hydriques climatiques habituels, y compris lors des années exceptionnelles du passé, permettait dans ces stations un grand développement des arbres et la présence d'une flore mésophiles. Lors des épisodes récents de canicule et sécheresse, cette compensation n'a plus été assurée (Vennetier et Ripert, 2010), et la flore comme les arbres ont subi dans ces sites des dégâts plus précoces et souvent plus intenses que dans les situations moyennement défavorables.

Dans le premier cas, la situation serait irréversible et le pin d'Alep, dont la capacité d'adaptation serait dépassée, ne pourrait sans doute plus assurer le couvert forestier. Il ne constitue pas une alternative durable sur les badlands de basse altitude. Il pourrait par contre à terme assurer une alternative au pin noir sur ce type de milieu à altitude moyenne (hors sites à risque de grands gels), où il trouverait dans le futur des conditions suffisantes pour sa survie et une croissance minimale lui permettant d'assurer des fonctions de protection. Le pin noir donne en effet sur certaines stations de l'arrière pays

méditerranéen en dessous de 1300 m des signes de faiblesses depuis 2003. S'il présente la même adaptation que le pin d'Alep aux contraintes trophiques des marnes et argilites, il est moins résistant à la combinaison forte chaleur/sécheresse (d'Epenoux, 1992).

Dans le second cas, c'est plus l'inadaptation des individus aux nouvelles conditions (ratio système aérien / système racinaire trop élevé, grande hauteur) qui est la cause des fortes mortalités observées actuellement. Mais la régénération n'est pas compromise et les nouvelles générations s'adapteront progressivement car elles en ont largement la capacité génétique, et leur croissance devrait être bonne. Dans les situations moyennes d'altitude et de fertilité, et sauf accidents majeurs, la productivité devrait continuer à augmenter lentement pendant la première partie du XXI^e siècle, avant de se réduire fortement dans la seconde moitié (Vila et Vennetier, 2003).

5 CONCLUSION

La topographie locale et générale, la profondeur et la texture du sol ainsi que la pluviométrie sont les facteurs clefs de la croissance actuelle et passée du pin d'Alep. Le pourcentage d'éléments grossiers, les affleurements rocheux et de cailloux contribuent à renforcer le poids du bilan hydrique local dans le modèle. La température n'intervient qu'ensuite, en raison de son interaction avec d'autres facteurs (pluie, exposition) qui masquent son importance localement. Son rôle est cependant clair à pluviométrie constante et le froid, avec la neige, constitue le principal facteur limitant l'extension de l'espèce vers le nord et en altitude.

Les facteurs trophiques jouent un rôle visible (calcaire dans la terre fine) mais secondaire en raison des faibles surfaces occupés par des sols chimiquement très pauvres dans l'aire française du pin d'Alep. La bonne croissance du pin d'Alep sur les sols assez pauvres des Maures et de l'Esterel montre qu'il n'est pas trop exigeant sur ce point.

Le pin d'Alep révèle l'impact des activités humaines passées, même très anciennes, qui ont façonné le paysage et le sol de façon durable, phénomène difficile à qualifier et quantifier sur le terrain.

Cette étude met en lumière la difficulté à modéliser les interactions complexes entre variables dans l'environnement. Des synergies entre facteurs apparaissent: le rôle de plusieurs facteurs très favorables ou très défavorables agissant simultanément est largement supérieur à la somme de leurs rôles respectifs tel qu'ils ressortent de l'optimisation des modèles.

Le changement global a conduit au cours du XX^e siècle à une accélération rapide de la croissance en hauteur du pin d'Alep. La hauteur des pinèdes provençales à 70 ans a gagné près de 4 m en un siècle. Cette accélération a dû être prise en compte pour la détermination de l'indice de fertilité du pin d'Alep sur chacune de nos placettes. Elle montre que la notion de fertilité des stations forestière est très évolutive dans le contexte actuel. Le froid étant un facteur limitant de la croissance du pin d'Alep, le réchauffement du climat et l'allongement de la saison de végétation (près de 15 jours en 40 ans - sont sans doute des facteurs déterminants de cette accélération. L'amélioration des sols laissés au repos et gagnés par la forêt, après des siècles ou des millénaires de dégradation et surexploitation, est sans doute aussi un facteur clef de cette accélération.

Mais les accidents climatiques récents ont montré que l'on risquait de franchir rapidement des seuils critiques en terme de bilan hydrique, et que l'équilibre entre le climat, le sol et la topographie pouvaient être modifié. La croissance du pin d'Alep montre déjà des signes de ralentissement (Girard et al. 2010).

Nos clefs autécologiques doivent donc être considérées comme des outils pratiques évolutifs qui devront être contrôlés et éventuellement adaptés dans quelques décennies.

Remerciements

Les travaux ont été financés par le Ministère de l'Alimentation, de l'Agriculture et de la Pêche, l'Agence Nationale de la Recherche (projet DROUGHT+ N° ANR-06-VULN-003-04), la région Provence-Alpes-Côte d'Azur et le Cemagref. Olivier Chandieux et Roland Estève en tant que techniciens et de nombreux stagiaires et étudiants dont particulièrement Fabien Brochiéro et Yaacoub Nassif ont contribué aux relevés de terrain et aux analyses de données.

Références

- Abbas H. ; Barbero M. ; Loisel R. - Réflexions sur le dynamisme actuel de la régénération naturelle du pin d'Alep (*Pinus halepensis Mill.*) dans les pinèdes incendiées en Provence calcaire. *Ecologia mediterranea*, vol. X, n° 3-4 (1984) p. 85-104.
- Abbas H. ; Barbéro M. ; Loisel R. ; Quézel P. - Les forêts de pin d'Alep dans le sud-est méditerranéen français analyses écodendrométriques, première partie. *Forêt méditerranéenne*, vol. VII, n° 1 (1985a) p. 35-42.
- Abbas H. ; Barbéro M. ; Loisel R. ; Quézel P. - Les forêts de pin d'Alep dans le sud-est méditerranéen français, analyses écodendrométriques, deuxième partie. *Forêt méditerranéenne*, vol. VII, n° 2 (1985b) p. 123-130.
- Achenar M. ; Lepart J. ; Debussche M. - La colonisation des friches par le pin d'Alep (*Pinus halepensis Miller*) en Languedoc méditerranéen. *Acta oecologica, Oecologica Plantarum*, vol. 5, n° 19 (1984) p. 179-189.
- Aubert G. - La déforestation et le sol. In: Usages et fonctions multiples de la forêt méditerranéennes. Guide Technique du Forestier Méditerranéen Français, chapitre 8, Cemagref édition Aix en Provence (2002) p. 8-11.
- Bariteau, M. - Variabilité géographique et adaptation aux contraintes du milieu méditerranéen des pins de la section halepensis : résultats (provisoire) des essais en plantations comparatives en France. *Forêt Méditerranéenne*, Vol. XIII, n°3 (1992) p. 179-181.
- Becker M. ; Bert G.D. ; Bouchon J. ; Picard J.F. ; Ulrich E. - Tendances à long terme observées dans la croissance de divers feuillus et résineux du Nord-Est de la France depuis le milieu du 19e siècle. *Revue Forestière Française*, vol. XLVI, n° 4 (1994) p. 335-341.
- Bonneau M. ; Souchier B. - Constituants et propriétés du sol. Masson ed., Paris (1979) 496 p.
- Brochiero F. ; Chandieux O. ; Ripert C. ; Vennetier M. - Autécologie et croissance du pin d'Alep en Provence calcaire. *Forêt méditerranéenne*, vol. XX, n° 2 (1999) p. 83-94.
- Couhert B. ; Duplat P. - Le pin d'Alep dans la région Provence Alpes Côte d'Azur proposition pour une sylviculture et un modèle de production. *Bulletin Technique de l'ONF*, vol. 25 (1993) p. 3-22
- D'Epenoux, F. Relations milieu-production. Application au Pin noir d'Autriche dans les Alpes externes méridionales. Thèse de doctorat, Cemagref Aix en Provence, Université de Grenoble, Saint martin d'Hères (1992) 227p.
- D'hanens G. - La régénération naturelle de pin d'Alep dans les peuplements mixtes de pin d'Alep, chêne vert et chêne pubescent. ENGREF, CRPF PACA, Cemagref Aix en Provence, Nancy (1997) 102 p.
- Devaux J.P. ; Le Bourhis M. - La limite septentrionale du pin d'Alep en France. Etude dendroclimatique de l'impact des froids exceptionnels. *Biologie Ecologie méditerranéenne*, vol. V, n° 4 (1978) p. 133-158.
- Duplat P. ; Tran-Ha M. - Indice de fertilité basé sur un modèle de croissance en hauteur. In: *Station forestière, production et qualité des bois : éléments méthodologiques*, (eds Buffet M. ; Girault D.), CEMAGREF, Nogent-sur-Vernisson (1989) p. 51-71.

- Dupouey J.-L. ; Dambrine E. ; Dardignac C. ; Georges-Leroya M. eds. - La mémoire des forêts. Actes du colloque « *Forêt, archéologie et environnement* » 14 - 16 décembre 2004, Velaine en Haye. ONF, INRA, DRAC Lorraine, Nancy (2005)
- Elhamrouni A. ; Sarson M. - Relation entre couvert végétal et régénération naturelle de *Pinus halepensis*. FAO, Fiche 30895, Rome (Italy) (1975) 10-11 p.
- Geppa-Sescpf - Synthèse des travaux de la commission "Cartographie". INRA (1981) 25 p.
- Girard François, Vennetier Michel, Ouarmim Samira., Caraglio Yves, Misson Laurent - 2010. Polycyclism, a fundamental tree growth process, decline with recent climate change. The example of *Pinus halepensis* Mill. in Mediterranean France. *Trees - Structure and Function* (2011) sous presse.
- Le Houerou H.N. - Atlas de la répartition de 250 espèces-clés dans le bassin méditerranéen. Le Houerou ed., Montpellier (2005) 220 p.
- Lebourgeois F. - Augmentation de la productivité des forêts françaises : bilan actuel et conséquences prévisibles. *Forêt-entreprise*, n° 162 (2005) p. 30-34.
- Loisel R. - Place et rôle des espèces du genre *Pinus* dans la végétation sud-est méditerranéen français. *Ecologia mediterranea*, n° 2 (1976) p. 131-152.
- Morin X. ; Chuine I. Réponse des essences ligneuses au changement climatique. Modification de la phénologie, des risques de gel et de la répartition des essences ligneuses nord-américaines. *Rendez-Vous techniques, hors-série n°3 Forêts et milieux naturels face aux changements climatiques* (2007) p. 15-20.
- Neveux M. ; Duhén L.M. ; Corti J.M. ; Devallois P. ; Fontanel J.L. ; Boiseau P. - Plaidoyer pour une sylviculture du Pin d'Alep par les techniciens de terrain. *Forêt méditerranéenne*, vol. VIII n° 1 (1986) p. 13-18.
- Nicault A. - Analyse de l'influence du climat sur les variations inter et intra-annuelles de la croissance radiale du pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.) en Provence calcaire. Thèse de doctorat, Aix-Marseille III, Marseille (1999) 254 p.
- ONF ; CRPF-PACA - Le pin blanc : une espèce provençale en plein essor. *Forêt méditerranéenne*, vol. XIII, n° 3 (1992) p. 207-215.
- Pardé J. - La productivité des forêts de pin d'Alep en France. *Annales de l'école nationale des eaux et forêts*, vol. XV, n° 2 (1957) p. 365-414.
- Quézel P. ed. - Pins du groupe *halepensis* : écologie, végétation, écophysiologie. Séminaire sur le Pin d'Alep et le pin *brutia* dans la sylviculture méditerranéenne. Tunis, 15-19 avril 1985, (1985) 340 p.
- Quézel P. ; Barbéro M. - Le pin d'Alep et les espèces voisines : répartition et caractères écologiques généraux, sa dynamique récente en France méditerranéenne. *Forêt méditerranéenne*, vol. XIII, n° 3 (1992) p. 158-170.
- Rathgeber C. - Impact des changements climatiques et de l'augmentation du taux de CO₂ atmosphérique sur la productivité des écosystèmes forestiers : exemple du pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.) en Provence calcaire (France). Thèse de doctorat, IMEP, Université d'Aix - Marseille III (2002) 312 p.
- Rathgeber C. ; Blanc L. ; Ripert C. ; Vennetier M. - Modélisation de la croissance en hauteur du pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.) en région méditerranéenne française. *Ecologia mediterranea*, vol. 30, n° 2 (2004) p. 205-218.
- Ripert C. ; Vennetier M. ; Blanc L. ; Brochiéro F. ; Chandiooux O. ; Chapelle B. ; Estève R. ; Gadiri N. ; Hervé J.C. ; Manlay R. ; Nassif Y. ; Rathgeber C. - Ecologie et croissance du pin d'Alep en France. Cemagref, Aix en Provence (2001) 38 p.
- Ripert C. ; Vennetier M. - Guide Technique du Forestier Méditerranéen Français. Chapitre 2 bis : Evaluation des potentialités forestières. Cemagref Edition, Aix en Provence (2002) 61 p.

- Serre F. - Les rapports de la croissance et du climat chez le pin d'Alep. *Acta oecologica plantarum*, n° 11 (1976) p. 3.
- Serre-Bachet F. - Les enseignements écologiques de la variation de l'épaisseur du cerne chez le Pin d'Alep. *Forêt méditerranéenne*, vol. XIII, n° 3 (1992) p. 171-176.
- Spiecker H. ; Mielikäinen K. ; Köhl M. ; Skovsgaard J.P. - Growth trends in European forests : studies from 12 countries. Springer-Verlag, Heidelberg (1996) 372 p.
- Vennetier M. ; Ripert C. ; Brochiero F. ; Chandieux O. - Evolution à court et long terme de la croissance du pin d'Alep en Provence. Conséquence sur la production de bois. *Forêt méditerranéenne*, vol. T. XX, n° 4 (1999) p. 147-156.
- Vennetier M. - Un nouveau modèle bioclimatique pour la forêt méditerranéenne. Application à l'étude de l'impact du changement climatique sur la végétation et à l'évaluation de la productivité forestière. Thèse de doctorat, Cemagref / Université Paul Cézanne (Aix-Marseille III) Aix en Provence (2007) 284 p.
- Vennetier M. ; Borgniet L. ; Thabeet A. ; Gadbin-Henry C. ; Ripert C. ; Vila B.; Prevosto B. ; Esteve R. ; Martin W. ; Ndyaye A. - Impact de la canicule 2003 sur les peuplements résineux de la région PACA. Rapport d'étude + Rapport de synthèse. Cemagref Aix en Provence (2008). 22 +14 p.
- Vennetier M. et Ripert C. - Flore méditerranéenne et changement climatique: la course-poursuite est engagée. *Forêt Méditerranéenne*, t. XXXI, n° 1 (2010), p. 15-24
- Vila B. et Vennetier M. Impact du changement climatique sur le déplacement d'une limite bioclimatique en région méditerranéenne. Cemagref Aix en Provence, IMEP, ECOFOR (2003) 141p
- Vila B.; Vennetier M.; Ripert C.; Chandieux O., Liang E-Y.; Guibal F.; Torre F. - Les changements globaux ont-ils déjà induit des changements de croissance en forêt méditerranéenne ? Le cas du pin d'Alep et du pin sylvestre de la Sainte-Baume. *Forêt Méditerranéenne*, T. XXIX, n°2 (2008) pp. 161-166.

Annexe 1: Description complémentaire de quelques variables

Pour l'observation et la notation de l'ensemble des variables on pourra se reporter au chapitre 2 bis du guide technique du forestier méditerranéen français (Ripert et Vennetier, 2002).

A - Réserve utile

Elle est calculée à l'aide du tableau A1 ci-dessous sur la base d'une détermination manuelle de la texture de la terre fine tamisée. On détermine pour chaque élément du sol, Sable (s, S), limon (l, L) et argile (a, A) s'il est abondant (lettre majuscule, présent mais minoritaire (lettre minuscule, ou absent (non cité). Ainsi un sable légèrement argileux = Sa, une argile contenant un peu de limon et de sable = sLa, un limon fortement argileux = LA, etc. Les argiles les plus lourdes et compactes sont notées AA et ont des propriétés physiques défavorables.

Les sables ont une réserve utile inférieure aux argiles et limons. Les mélanges limon-argile, avec ou sans une petite quantité de sable, sont plus favorables que les limons ou argiles purs. Les mélanges équilibrés de sable, limon et argile ont des propriétés particulièrement favorables.

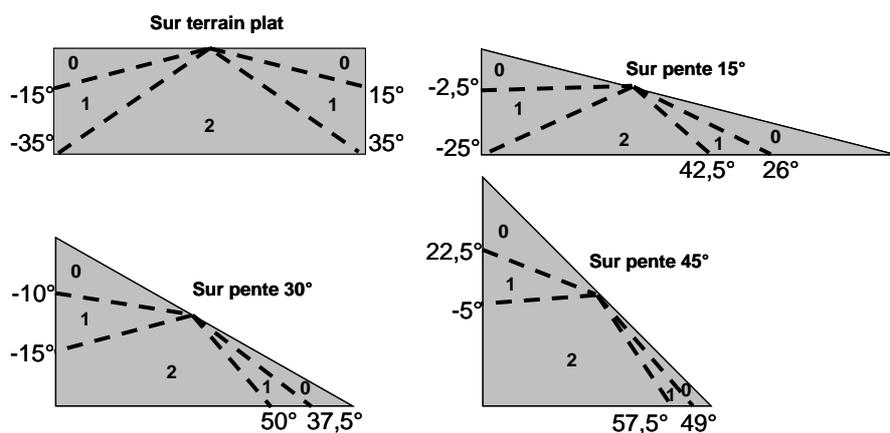
Tableau A1: réserve utile en eau du sol (mm/m) en fonction de la texture

S	Sl	SlA	SL	Sa	sL	SA	SLA	SLa	AA
70	100	117	122	135	145	152	157	160	165
sA	sLA	A	L	sLa	Al	sLA	LA	La	SLA
170	170	175	175	176	180	181	187	195	200

B - pendage stationnel

Il est estimé sur la base du graphique et des tableaux ci-dessous

0 = pentages défavorables, 1 = pentages neutre, 2 = pentages favorables



Limite entre classes de pendage

Coté amont
 limite 0 / 1 $y = 0.8333x - 15$
 limite 1 / 2 $y = 0.6667x - 45$

Coté aval
 limite 0 / 1 $y = 0.75x + 15$
 limite 1 / 2 $y = 0.5x + 35$

Pente en degrés	Coté amont	
	0 / 1	1 / 2
0	-15.0	-35.0
5	-10.8	-31.7
10	-6.7	-28.3
15	-2.5	-25.0
20	1.7	-21.7
25	5.8	-18.3
30	10.0	-15.0
35	14.2	-11.7
40	18.3	-8.3
45	22.5	-5.0

Pente en degrés	Coté aval	
	0 / 1	1 / 2
0	15	35
5	18.75	37.5
10	22.5	40
15	26.25	42.5
20	30	45
25	33.75	47.5
30	37.5	50
35	41.25	52.5
40	45	55
45	48.75	57.5