

Evolution à court et long terme de la croissance du pin d'Alep en Provence

Conséquences sur la production de bois

par Michel VENNETIER, Christian RIPERT, Fabien BROCHIERO
et Olivier CHANDIOUX *

1. Introduction

Cet article fait suite à celui qui a été publié dans Forêt Méditerranéenne Tome XX, n° 2, (BROCHIERO et al ; 1999) sur l'autécologie du pin d'Alep. C'est le croisement des résultats convergents de l'étude autécologique ci-dessus et d'une étude des potentialités forestières en Provence calcaire (VENNETIER et al ; 1997), réalisées séparément, qui nous a poussés à approfondir l'analyse des données, et à éclaircir quelques points qui restaient en suspens sur la croissance du pin d'Alep.

Au cours des études autécologiques réalisées par le Cemagref sur les espèces forestières méditerranéennes, les auteurs successifs avaient noté que, dans des conditions identiques, les jeunes générations poussaient plus vite que les anciennes : par exemple le cèdre de l'atlas *Cedrus atlantica* (RIPERT et BOISSEAU, 1993), et le pin laricio *Pinus nigra* ssp *laricio* (NOUALS et BOISSEAU, 1992). Des constatations similaires ont été faites par de nombreux auteurs depuis une

quinzaine d'années dans toute la France et dans le reste de l'Europe, pour la hauteur ou le diamètre : par exemple le sapin pectiné (*Abies alba* Mill.) dans le Jura (BERT, 1992) et les Vosges (BECKER et al., 1994) ; l'épicéa (*Picea abies* Karst.) dans les Vosges (BECKER et al., 1994) ; le hêtre (*Fagus sylvatica* L.) dans les Vosges (BADEAU, 1995) ; les chênes (*Quercus robur* L. et *Quercus petraea* Liebl.) sur le plateau lorrain (BECKER et al., 1994) ; le pin laricio (*Pinus nigra* ssp *laricio* Maire.) dans l'ouest de la France (LEBOURGEOIS et BECKER, 1996) ; le pin cembro (*Pinus cembra* L.) dans les Alpes autrichiennes (NICOLLUSSI et al, 1995) ; le chêne pubescent (*Quercus humilis*) en Provence calcaire (RATHGEBER et al., 1999), etc ...

Des évolutions similaires affectent les forêts boréales d'Amérique du Nord et de Sibérie, et les forêts tempérées des Etats-Unis. Les travaux récents cherchent à identifier les causes et les conséquences de ce phénomène. Parmi les causes qui ont été démontrées expérimentalement en milieu contrôlé ou par des études approfondies en milieu naturel, on peut noter l'allongement de la période de végétation dû à un réchauffement

du climat (MENZEL et FABIAN, 1999), l'accroissement du taux de CO₂ et les dépôts azotés (issus de la pollution atmosphérique), et l'amélioration des sols forestiers à la suite de l'abandon de pratiques ancestrales destructives : ramassages de litières, de bois mort, de mousses, de fougères, surpâturage, brûlage, ... (GLADZEL, 1999).

Peu de travaux ont porté jusqu'à présent sur la zone méditerranéenne. Nous avons donc voulu apporter une modeste contribution à la connaissance de ce phénomène important pour nos écosystèmes, ce que nous pouvions tenter de faire rapidement à partir de notre base de données existante.

2. Les bases de l'étude

2.1. Zone d'étude

La zone d'étude (Cf. Fig.1) couvre 500 000 ha dans la partie ouest de la Provence, dont 100 000 ha environ de pin d'Alep en peuplements purs ou mixtes. A cheval sur les départements des Bouches-du-Rhône, du Var et du Vaucluse, elle est limitée par la Méditerranée au sud et le Luberon au

* Cemagref, Division Agriculture et Forêt Méditerranéenne, BP 31 13612 Aix en Provence Le Tholonet cedex 1

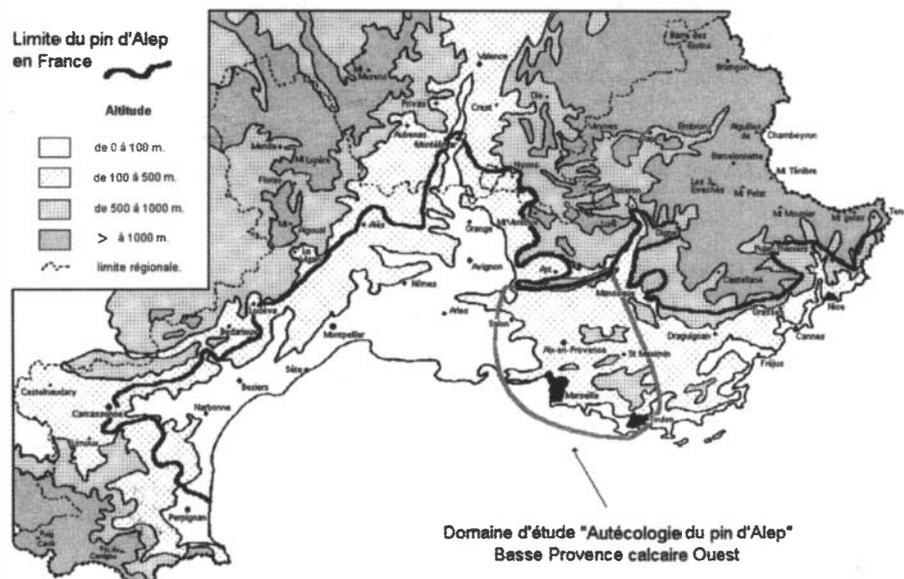


Fig. 1 : Zone d'étude

nord, la vallée du Rhône à l'Ouest et celle du Gapeau à l'Est.

Le climat est typiquement méditerranéen avec deux sous ensembles (RIPERT et NOUALS, 1988) :

- la Basse Provence caractérisée par un long été sec (2 à 4 mois, jusqu'à 6 ou 7 les années exceptionnelles), des pluies annuelles de 500 à 800 mm avec des pluies d'été < 100 mm, une température moyenne de 12 à 14 °C et 1 à 3 mois froids¹ (CNRS, 1975) ;

- l'arrière-pays, avec une période sèche estivale plus courte (1 à 3 mois, rarement plus), une température moyenne annuelle plus basse (<12°C), des pluies totales plus abondantes (800 à 1100 mm) avec malgré tout de faibles pluies d'été (100 à 150 mm) et 3 à 5 mois froids en hiver.

A l'extrémité Sud-Est de la zone d'étude, se distingue une très étroite frange côtière à climat thermo-méditerranéen, avec une température moyenne plus élevée (15°C), sans mois froids, des pluies équivalentes à la basse Provence, des étés plus tempérés. Sa surface est négligeable par rapport aux deux ensembles précédents.

Les calcaires durs dominent dans la zone d'étude. Marnes, dolomies, grès, argilites, et roches assimilées se parta-

gent le second plan, avec tous les intermédiaires entre ces différentes roches. La plupart de ces roches mères sont carbonatées, d'où la rareté des sols acides.

2.2. Peuplements de référence et données

Seules des forêts âgées, non brûlées depuis plus de 30 ans, peu perturbées actuellement et peu anthropisées ont été prises en compte, pour éliminer les effets imprévisibles des usages variés du milieu et de la gestion forestière. Nous avons cependant installé des placettes sur d'anciennes restanques (terrasses de culture), qui représentent de grandes surfaces dans la zone d'étude.

Au total, 320 placettes ont été inventoriées. L'échantillonnage est basé sur le croisement complet de 4 variables principales - altitude, climat, roches et indice de climat lumineux de Becker - et sur une distribution aussi équilibrée que possible des variables locales qui décrivent la topographie et les paramètres du sol. Près de 900 couples âge/hauteur sont disponibles, pour des pins d'Alep de 15 à 180 ans. Parmi ces arbres, 109 ont été abattus dans 31 placettes réparties dans toute la zone d'étude, et débités en tronçons de 0,5 à 2 m de long pour reconstruire leur courbe de croissance depuis leur naissance, par analyse de tiges².

2.3. Modèle de croissance du pin d'Alep

Le modèle de croissance est calculé pour ajuster au mieux une courbe mathématique aux courbes réelles de croissance obtenues avec les analyses de tiges.

Dans notre étude, les peuplements sont majoritairement irréguliers, et plusieurs générations se côtoient fréquemment au sein des placettes. Le modèle de croissance a donc été calculé arbre par arbre, et non comme cela se fait classiquement sur la croissance moyenne des placettes. Notre approche permet la comparaison de différentes générations dans des conditions rigoureusement identiques au sein des placettes.

Le modèle dessine une série de courbes qui servent de référence, et dont certaines, régulièrement espacées et choisies d'après les besoins des gestionnaires, définissent des classes de fertilité (Cf. Fig. 2). Il permet le calcul d'un "indice arbre", correspondant à la hauteur atteinte par cet arbre à un âge de référence donné : dans notre cas 70 ans (H70). Cet âge correspond à l'âge moyen de notre échantillon et il est proche de l'âge habituel d'exploitabilité du pin d'Alep en Provence.

L'indice de fertilité d'une placette est ensuite calculé en faisant la moyenne des H70 de tous les arbres mesurés de cette placette dont l'âge est compris entre 35 et 150 ans.

En effet, le modèle ne permet de prédictions fiables du H70 que pour les arbres de plus de 35 ans. Au-dessous de cette limite, la croissance des arbres dépend de paramètres non identifiés ou non quantifiables qui la rendent très irrégulière : phase d'installation de durée très variable, concurrence rude avec la végétation du maquis, notamment les chênes blanc et kermès, ... En raison du faible nombre d'arbres très âgés, le modèle n'est pas non plus fiable au-delà de 150 ans.

2 - Une analyse de tige consiste à compter les cernes de la tige sur des sections transversales à différentes hauteurs. On sait ainsi quel âge avait l'arbre à chacune de ces hauteurs, ce qui permet de reconstituer sa courbe de croissance

1 - Mois froid : mois dont la température moyenne est inférieure à 7°C

Le modèle est donné ci-dessous à titre indicatif :

$$H_{70} \text{ (estimé)} = H_i \frac{(1 - \exp(-0.021 * 70))}{(1 - \exp(-0.021 \text{ âge}_i))}^{1.5385}$$

avec :

H_i et âge_i : hauteur et âge de l'arbre mesurés sur la placette;

70 : l'âge de référence

-0.021 et 1.5385 : coefficients d'ajustement du modèle aux courbes de croissance.

3. Variations à long terme

3.1. L'effet génération sur l'indice arbre

Dans la figure 2, représentant l'ensemble de l'échantillon, on se rend compte que les arbres âgés se trouvent tous dans les classes de fertilité faibles ou moyennes, et que de nombreux arbres jeunes se situent dans les classes supérieures de fertilité, y compris

pris au-delà de la classe 1, où on ne rencontre aucun arbre de plus de 80 ans.

De même en observant les courbes de croissance des arbres de différentes générations dans une même placette, de fertilité a priori homogène, on note que les jeunes arbres ont souvent une croissance plus rapide que les anciens au même âge (Cf. Fig. 3).

Cela nous a amenés à rechercher s'il existait une corrélation entre les H70 des arbres et leur âge actuel. On a mis ainsi en évidence un "effet génération" : les arbres jeunes ont tendance à avoir des indices globalement meilleurs que les vieux, la variation d'indice se montant à 7,9 cm/an.

Cependant, cette relation étant calculée sur l'ensemble des placettes de l'échantillon, elle peut dépendre en partie de facteurs circonstanciels anthropiques, ou du protocole :

- répartition déséquilibrée des classes d'âge dans les classes de fertilité, les vieux se trouvant majoritairement sur des sites moins fertiles : cette hypothèse est plausible dans la mesure où les peuplements actuels de pin d'Alep sont majoritairement issus de la déprise agricole, et où les terrains les plus mauvais ont été abandonnés les premiers.

- récolte préférentielle des arbres sur les meilleurs sites : dans les sites fertiles, les arbres grandissent plus rapidement et sont généralement plus droits. Ils sont donc plus susceptibles d'être exploités, et de l'être plus précocement, donc de ne pas pouvoir vieillir.

Il a effectivement été difficile de trouver des forêts peu perturbées et comportant des arbres d'âge élevé sur des sites très fertiles.

Pour éliminer dans le calcul tout risque de biais lié à ces problèmes, il faut étudier les variations de l'indice de fertilité à l'intérieur des placettes. Pour cela, on a cherché à mettre en relation les différences d'âge et de hauteur, entre chaque arbre et la moyenne de sa placette, pour les placettes qui possédaient plusieurs générations.

$$[H_{70} \text{ arbre} - H_{70} \text{ placette}] = f [\text{âge arbre} - \text{âge placette}]$$

Cette relation est un peu moins forte que la précédente mais suffisamment claire et statistiquement fiable. Elle établit que l'effet "génération" sur l'in-

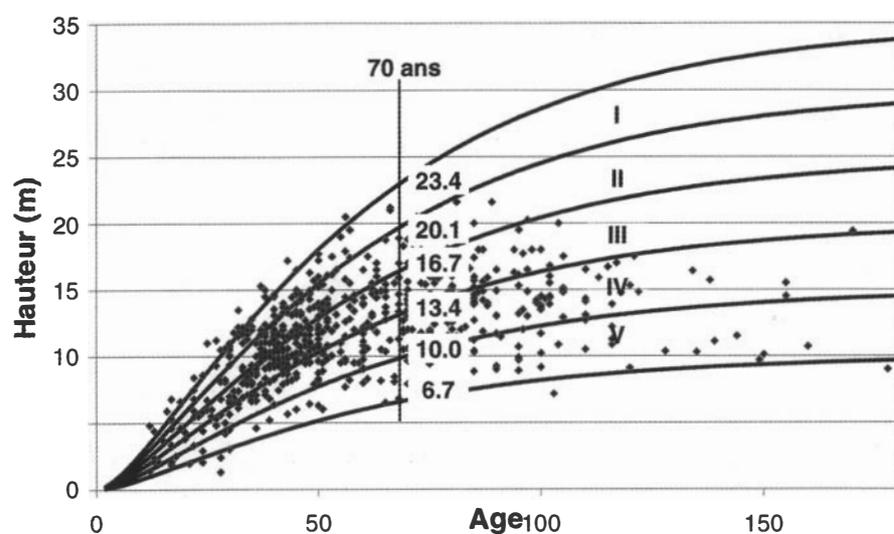


Fig. 2 : Faisceau de courbes modèles et nuage des couples âge/hauteur

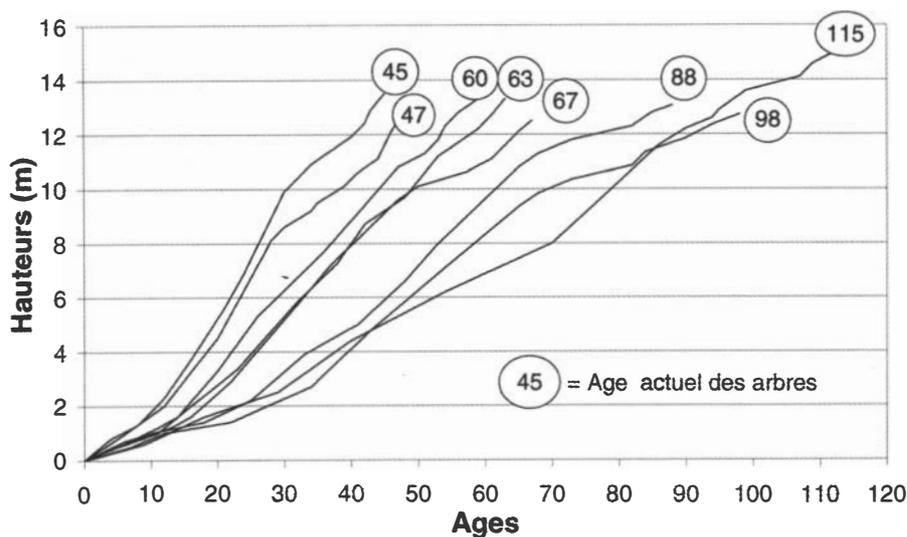


Fig. 3 : Comparaison des courbes de croissance d'arbres d'âge différent sur un site homogène

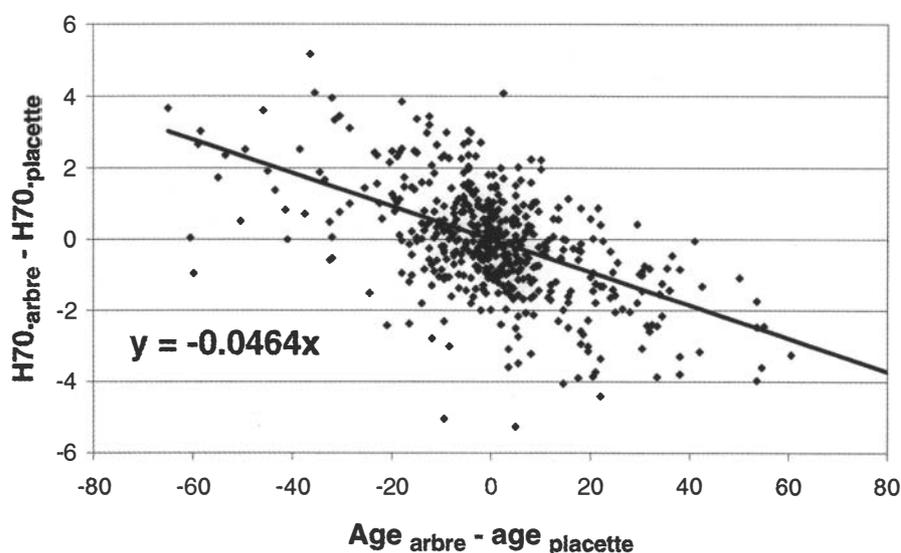


Fig. 4 : Variation intra-placette de l'indice de fertilité (H70) du pin d'Alep en fonction de l'âge actuel

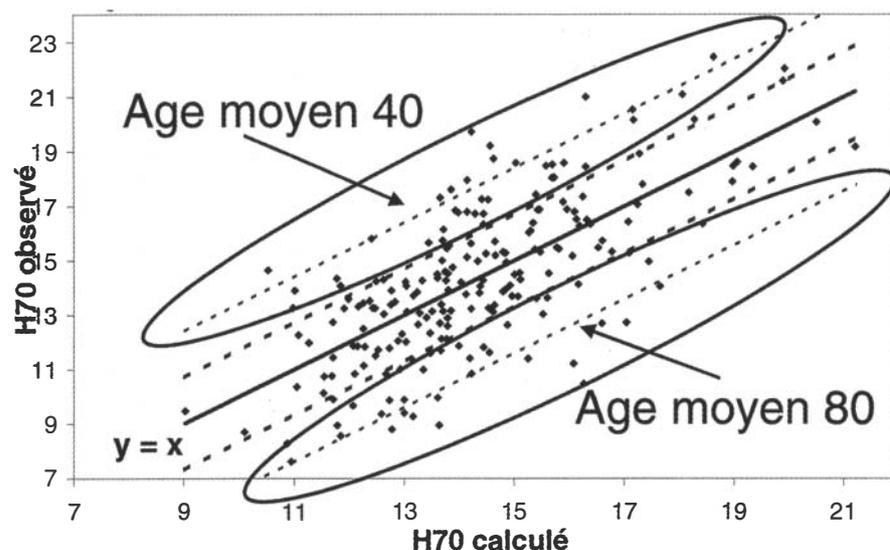


Fig. 5 : H70 réel en fonction du H70 prédit par le modèle pour le pin d'Alep.

	Croissance en hauteur annuelle			Différence croissance observée - modèle			
	1972/81	1982/90	1991/97	1972/81	1982/90	1991/97	1972/97
Mesurée	0.29	0.20	0.25	0.055	-0.019	0.048	0.012
max	0.75	0.37	0.50	0.38	0.12	0.24	0.114
min	0.08	0.06	0.08	-0.22	-0.16	-0.13	-0.120
Modèle	0.235	0.219	0.202				

Tab. I : Variation de la croissance en hauteur du pin d'Alep 1972 - 1997 (m/an)

dice H70 atteint 4,64 cm/an, indépendamment de la fertilité du site (Cf. Fig. 4).

3.2. Indice de potentialités

Au cours de l'étude des potentialités forestières de la Provence calcaire, un modèle a été spécialement calculé pour prédire l'indice de potentialité du pin d'Alep à partir des seules variables du milieu, indépendamment de la flore. Ce modèle n'est pas détaillé ici (VENNETIER et al, 1997). Il prend en compte 9 variables décrivant principalement la topographie et les caractéristiques du sol. La précision obtenue est relativement bonne (Cf. Fig. 5) puisque le modèle prédit 89 % des hauteurs dans une fourchette d'une classe de fertilité, et même 62 % dans une fourchette d'une demi-classe de fertilité.

En recherchant les variables supplémentaires qui pourraient expliquer partiellement les erreurs restantes, on s'est aperçu que la plupart des arbres situés très au-dessus des prédictions étaient jeunes, et qu'à l'inverse ceux qui étaient surestimés par le modèle étaient majoritairement vieux (Cf. Fig.5). Le calcul d'une droite de régression montre que les erreurs résiduelles de prédiction sont effectivement liées à l'âge des arbres. La relation donne cette fois un "effet génération" de 4,4 cm/an, très proche de celui obtenu dans l'étude autécologique (§ 3.1).

Dans les placettes qui présentent deux ou trois générations étalées sur plus de 80 ans, il a été possible de vérifier que l'indice H70 avait gagné entre 3 et 5 m en un siècle, soit une classe de fertilité ou plus.

La fertilité des stations forestières apparaît donc comme une notion évolutive.

4. Variations à court terme

4.1. Variations au cours des 30 dernières années

Dans les courbes de croissances individuelles issues des analyses de tiges, y compris pour les plus vieux

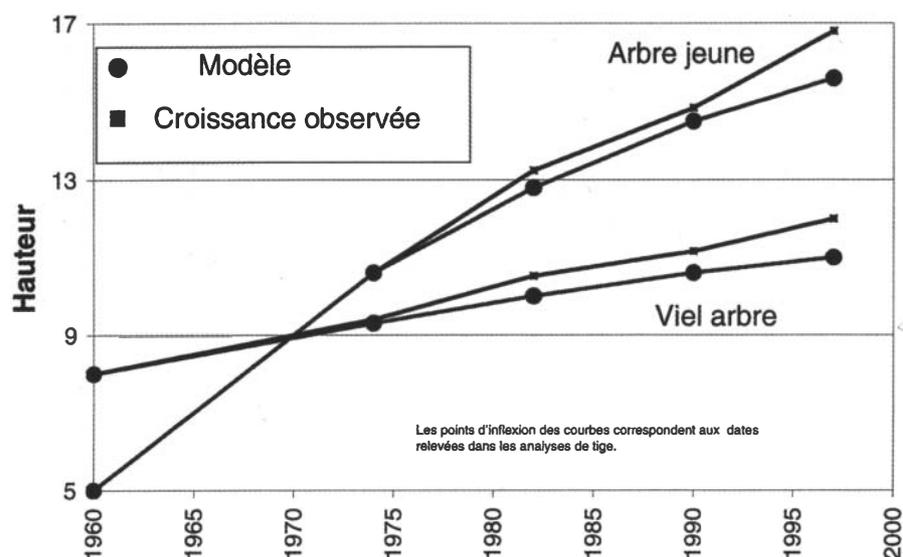


Fig. 6 : Comparaison de la croissance moyenne des arbres avec le modèle depuis 1961. Courbes types de deux générations : 35-70 et 71-110 ans

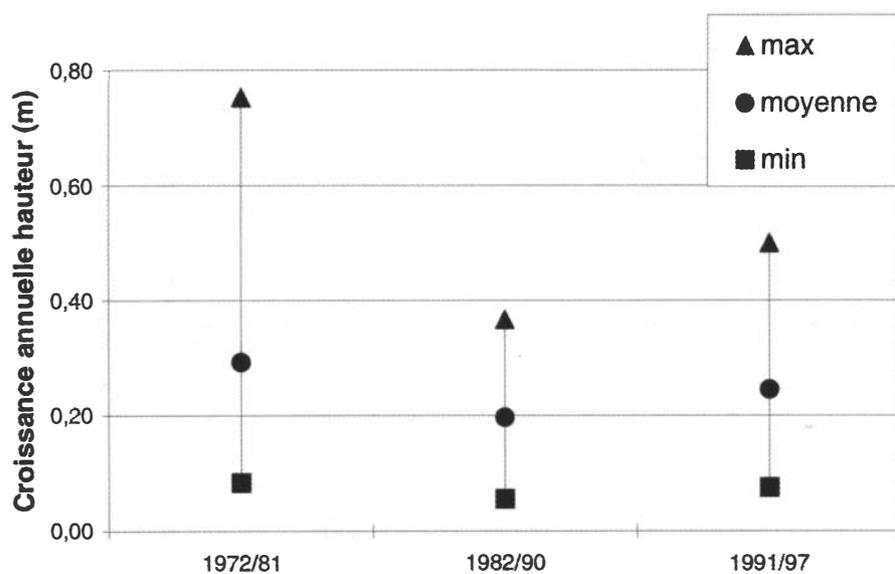


Fig. 7 : Variations de la croissance en hauteur du pin d'Alep 1972 - 1997

arbres, on peut distinguer 3 phases au cours des 30 dernières années (Cf. Fig. 6) : (1) 1972/81 : croissance rapide, (2) 1982/90 : croissance réduite, (3) 1991/97 : accélération. Ces tendances se manifestent aussi bien dans la croissance moyenne que dans les maxima et minima. (Cf. Fig. 7). On les détecte nettement par comparaison des courbes individuelles de croissance avec la courbe du modèle qui gomme les variations à court terme pour ne retenir que la tendance générale à long terme (Cf. Tab. I et figure 6).

Le choix des périodes 61-71 / 72-81

/ 82-90 / 91-96 n'est pas arbitraire. Il ressort de l'analyse statistique sur la croissance en hauteur des arbres. Le découpage retenu est celui qui permettait de différencier les quatre périodes de la façon la plus significative. Mais le protocole initial, qui n'était pas prévu pour ce travail détaillé, ne prévoyait pas en analyse de tige des découpes nombreuses et serrées dans les parties sommitales des arbres. Ces découpes ne tombaient pas forcément de façon exacte sur les années limites. Nous avons éliminé des calculs les mesures qui chevauchaient trop celles-

ci, mais il reste des mesures qui sont décalées d'un ou deux ans sur les années limites. Les périodes choisies doivent donc être considérées avec cette précision relative d'un à deux ans. Les travaux en cours permettront de remédier à cette incertitude et de mieux préciser les relations croissance-climat.

La chute de croissance des années 80 est difficile, prise isolément, à différencier du ralentissement normal de la croissance avec l'âge. Entre 1982 et 1990, la courbe de croissance épouse celle du modèle à peu de choses près. Ce sont les accélérations qui la précèdent et lui succèdent qui soulignent son caractère particulier. L'accélération finale dans les années 90 est d'autant plus remarquable qu'elle touche aussi des arbres très âgés, dont la croissance devrait être quasiment nulle et dont on ne soupçonnait pas la capacité de reprise.

4.2. Lien avec les variations climatiques

Les variations de la croissance du pin d'Alep peuvent être mises en relation avec des variations pluriannuelles du climat de la zone d'étude. Les valeurs prises en compte sont des moyennes sur l'ensemble des postes météo de cette zone. Si on observe des décalages quantitatifs logiques entre les postes, suivant différents gradients connus (altitude, continentalité, ouest-est), les variations mensuelles et annuelles sont d'une très grande homogénéité sur l'ensemble de la zone, ce qui donne un sens aux moyennes sur des périodes pluriannuelles.

Comparée aux années 72-81 et 91-96, la période 82-90 est caractérisée par des années plus sèches (baisse moyenne de 20% de la pluviométrie), à la fois sur l'ensemble de l'année et sur la saison de végétation. C'est notamment une sécheresse persistante en septembre, prolongeant le stress estival, qui est à l'origine de cette baisse. L'indice utilisé pour la détermination des mois secs $P - 2t^{\circ}$ (avec P = total des pluies du mois en mm et t° = température moyenne mensuelle en $^{\circ}\text{C}$), cumulé sur plusieurs mois, permet d'illustrer cette tendance (Cf. Fig. 8). Dans la période 82-90, les indices de sécheresse cumulés négatifs traduisent un déficit hydrique sur l'en-

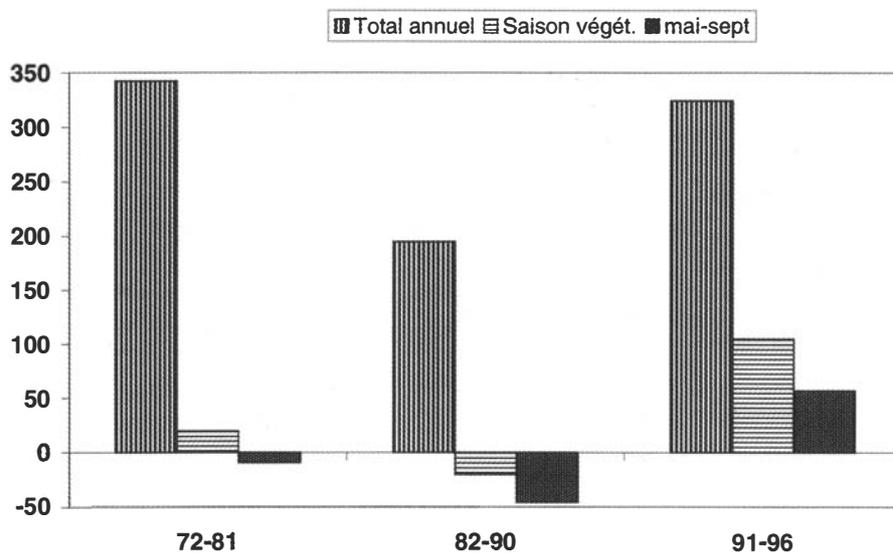


Fig. 8 : Indices de sécheresse cumulés pour trois périodes de référence

semble de la saison de végétation (mars-septembre).

Les années 1984 à 87, sans être très arrosées, n'ont pas été trop sèches, mais ont par contre été marquées par plusieurs hivers très froids et pour certains tardifs, défavorables au pin d'Alep, et qui ont empêché les arbres de profiter pleinement des pluies de printemps. Les années 82 et 83 ont par ailleurs été marquées par des extrêmes de chaleur en été et les étés globalement les plus chauds, accentuant le déficit hydrique, notamment en 1982, la 2^{ème} plus sèche des 30 dernières années après 1989.

Si on considère la période 1972 - 96, les années 82-90 cumulent quatre des cinq années les plus sèches, les deux étés les plus chauds, les trois hivers les plus froids. En 1989, le cumul sur l'année entière des indices mensuels de sécheresse ($P - 2t^\circ$) est négatif, déno-

tant un déficit hydrique global sur 12 mois, situation qui ne s'est produite qu'une seule autre fois (1967) sur notre base de données 61-96. C'est donc une conjonction d'extrêmes climatiques qui peut expliquer la réduction de la croissance pour la période 82-90.

De 1972 à 1981 et de 1991 à 1996, la situation est plus favorable, avec des printemps en moyenne doux et précoces (que l'on peut illustrer par les températures du mois de mars (Cf. Tab.II), des sécheresses d'été relativement courtes, (pluies abondantes au printemps et/ou en septembre), et des hivers sans grands froids.

On note que de 1961 à 1996, il n'y a aucune période qui se distingue dans la pluviométrie des trois mois d'été (juin-août), très faible, caractéristique du climat méditerranéen. Les différences se jouent principalement au printemps et en automne.

Période	72-81	82-90	91-96
T° moyenne mensuelle	9.2	9	9.9
Moyenne des minimum	4.2	3.7	4.5
Moyenne des maximum	14.3	14.2	15.3
Moyenne des Minimorum*	-1.1	-1.7	-0.6
Moyenne des Maximorum*	20.6	19.8	21.4

* Le minimorum et le maximorum mensuels correspondent à la température respectivement la plus basse et la plus haute atteinte dans le mois

Tab. II : Températures du mois de mars (°C)

On note que si les débuts de printemps sont plus doux en moyenne dans les années 70 et 90 que dans les années 80, globalement, le climat de la zone d'étude a été marqué par une tendance au réchauffement au cours des 40 dernières années, après un léger repli dans les années 70 par rapport aux années 60. Ce réchauffement est perceptible sur toutes les composantes de la température, en valeur absolue (Cf. Tab. III) et en valeur relative (Cf. Fig. 9). Il est favorable au pin d'Alep, qui est nettement thermophile en Provence (SERRE 1973, 1976).

Cette présentation graphique du tableau III permet de comparer l'évolution relative des composantes de la température, très différentes en valeur absolue, et de constater la similitude de ces évolutions par rapport à leur moyenne respective.

5. Discussion

5.1. Causes

L'accélération de la croissance du pin d'Alep commence il y a plus de 80 ans. Au moins trois raisons écologiques et d'usage du milieu peuvent expliquer ce phénomène précoce.

- Usages et pratiques dans le milieu naturel

Parmi les usages, le gemmage et les feux courants (écobuage) étaient sans doute les plus néfastes à la croissance des arbres. Les dates de gemmage et de feux sont généralement faciles à lire, même pour les très vieux arbres, grâce aux cicatrices que laissent ces événements au niveau des cernes de croissance. Nous n'avons pas de référence sur les conséquences du gemmage sur la croissance du pin d'Alep, mais elles sont sans doute semblables à ce qui s'observe sur d'autres espèces de pin. Les arbres gemmés n'ont pas été utilisés pour les analyses de croissance en hauteur, mais la plupart d'entre eux montrent une accélération de la croissance en diamètre après arrêt des saignées.

Par analogie avec ce que nous observons sur les peuplements plus jeunes brûlés récemment, nous supposons que chaque incendie du passé, bien que n'ayant pas tué les arbres, a

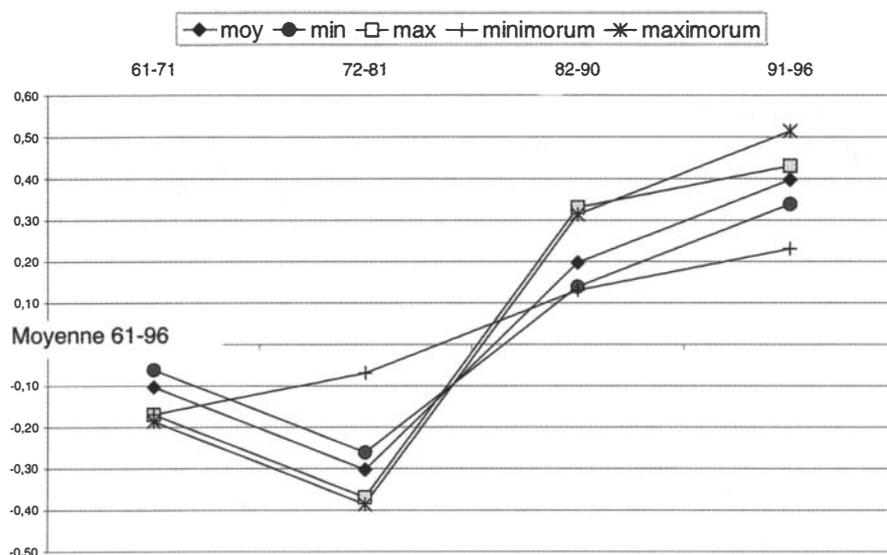


Fig. 9 : Variation des composantes thermiques autour de leur moyenne 1961-96

Période	61-71	72-81	82-90	91-96	61-96
T° moyenne annuelle*	13.3	13.1	13.6	13.8	13.40
Moyenne des minimum*	8.1	7.9	8.3	8.5	8.16
Moyenne des maximum*	18.5	18.3	19	19.1	18.67
Moyenne des Minimorum*	2.6	2.7	2.9	3	2.77
Moyenne des Maximorum*	23.8	23.6	24.3	24.5	23.99

* : Moyennes pour les 12 mois de toutes les années considérées.

Tab. III : Evolution des températures (°C) au cours des 35 dernières années

arrêté ou limité leur croissance pendant 2 à 5 ans, et parfois plus en cas de destruction partielle du houppier. On retrouve ainsi derrière les cicatrices de feu des séries de cernes de croissance très réduits parfois presque invisibles.

Comme les pratiques de gemmage et d'écobuage ont été progressivement abandonnées au cours du XX^e siècle, les arbres ont été libérés d'une contrainte majeure.

- Compétition et abri

La déprise agricole et la réduction des feux courants ont conduit à la dissémination et à la multiplication progressive des arbres jusque là clairsemés, ou isolés. Les nouvelles générations ont donc poussé dans un environnement concurrentiel, ce qui, chez la plupart des espèces, conduit pour les sujets non dominés à une croissance en hauteur plus rapide³.

3 - La loi de Eichorn, qui postule que la hauteur dominante des arbres ne dépend que de la fertilité du site et non de la densité du peuplement, s'applique dans les peuplements relativement homogènes, et dans une large gamme de densité, mais pas pour les peuplements très ouverts et les arbres isolés, ni les peuplements totalement inéquiennes où les phénomènes de compétition entre générations interfèrent fortement avec la fertilité. La fertilité de la station pour une espèce donnée évolue rapidement sous l'effet des changements actuels d'environnements global et local, et avec elle la hauteur potentielle des arbres.

Même en absence de compétition directe, les arbres ont poussé dans une ambiance de plus en plus forestière, procurant abri latéral et protection dans un microclimat plus favorable que les terrains majoritairement ouverts et agricoles. Dans les peuplements vieillissants de pin d'Alep, un sous-étage s'installe progressivement, constitué des chênes vert et blanc, ainsi que de nombreuses autres espèces arborescentes (TATONI et al, 1994). Dans les peuplements mélangés de pin d'Alep et chênes, la rotation du taillis s'est allongée, passant de 15-30 ans au début du siècle à 30-50 ans actuellement dans les forêts gérées, et souvent au-delà de 50 ans ailleurs dans les peuplements abandonnés. Cet allongement contribue à accentuer le caractère forestier des peuplements.

- Amélioration du sol

La réduction des feux, du surpâturage, des prélèvements de divers végétaux, de bois mort, de litière, de terre végétale, combinés avec le développement des peuplements, ont conduit à une amélioration progressive des sols, qui en retour favorise la croissance des arbres (VAUDOUR, 1991). Dans la plupart de nos placettes, un horizon humifère est présent, alors qu'il est absent dans des placettes voisines, dans les mêmes conditions de milieu mais sous des peuplements plus récents ou dégradés.

- Combinaison de causes

Aucune des explications ci-dessus ne peut expliquer seule l'accélération observée. C'est leur combinaison et l'effet synergique de l'ensemble qui joue. On est dans une dynamique auto-entretenu : l'amélioration et l'enrichissement des peuplements profite au milieu naturel, qui s'améliore, ce qui profite en retour à la croissance des arbres.

- Autres causes probables

Comme le suggèrent de nombreuses études menées depuis 15 ans en Europe et ailleurs dans le monde, l'accroissement du taux de CO₂, les changements climatiques à long terme et les dépôts azotés atmosphériques sont sans doute pour beaucoup dans le processus d'accélération de la croissance du pin d'Alep. Notre protocole n'ayant pas été conçu dans cet objectif, il n'est pas possible d'évaluer l'importance

relative des causes locales et des causes plus globales dans le phénomène.

5.2. Conséquences

Quelles qu'en soient les causes, la hauteur du pin d'Alep a gagné environ 4 m en moyenne sur 100 ans, soit plus d'une classe de fertilité (dans notre échelle qui en compte 5). L'accélération semble se poursuivre dans toute la zone d'étude, indépendamment de la fertilité actuelle des sites.

Si on considère les 250 000 ha de peuplements français de pin d'Alep, un gain de seulement une demi-classe de fertilité supplémentaire (environ $0,75\text{m}^3/\text{ha}/\text{an}$) dans les 30 ans à venir signifierait, par rapport au niveau actuel, une production supplémentaire de 180 000 m^3/an (à comparer aux 100 000 m^3 actuellement exploités). Cette estimation mériterait d'être précisée sur des bases plus solides.

Il est évidemment impossible de prévoir la tendance à long terme de l'accélération de la croissance. Théoriquement, la tendance actuelle pourrait être freinée par :

- La fertilité globale des milieux (risque de carence en éléments nutritifs), mais cela a peu de chance d'arriver dans notre zone d'étude, où les roches mères carbonatées et les sols qui en dérivent sont majoritairement riches en éléments nutritifs et chimiquement équilibrés.

- Les limites physiologiques de l'espèce, que ce soit pour la croissance ou l'adaptabilité aux changements d'environnement, dont le climat (KELLER et al, 1997). Mais le pin d'Alep est très loin de ses limites écologiques pour la chaleur et la sécheresse dans cette zone. Il est aussi loin de ses limites physiologiques de croissance sur les sols habituels de Provence, comme en témoignent des arbres exceptionnels dans les meilleurs sites. Il a également un potentiel d'amélioration de sa croissance à travers l'effet fertilisant du CO_2 (RATHGEBER et al, 1999)

- Par des déséquilibres dans l'évolution de l'écosystème : explosion de populations de parasites (MIRAULT et REGAD, 1992), remplacement des champignons mycorhiziens actuels par des associations moins performantes, etc ... Il y a beaucoup d'incer-



Photo 1 : Au début du siècle, les pins étaient souvent disséminés dans un milieu à dominante pastorale. D'où leur forme médiocre, et leur croissance ralentie.

Photo M. Vennetier



Photo 2 : La déprise agricole a permis aux pins de régénérer en bouquets denses à l'abri des anciens.

Photo M. Vennetier

titudes et très peu de références sur ces risques.

Cependant, comme l'environnement forestier méditerranéen, particulièrement le sol, est loin d'avoir terminé son processus de reconstitution et d'amélioration, comme les causes extérieures du changement (réchauffement climatique, CO_2 , dépôts azotés) ne semblent pas être sur le point de disparaître, il est probable que l'indice de fertilité du pin d'Alep continuera à s'améliorer dans les prochaines années.

6. Conclusion

Les forêts résineuses méditerranéennes de basse altitude ont perdu aujourd'hui une grande part de leur importance économique dans la filière bois, à cause de leur faible productivité réelle ou supposée, et de la qualité médiocre des arbres. Ce tableau défavorable est biaisé par l'image des forêts anciennes, poussant en ordre dispersé sur les plus mauvais sites, et soumises à un usage intensif.

Avec l'extension rapide des forêts



Photo 3 : L'étape suivante de l'évolution des pinèdes est le retour des chênes. L'ambiance forestière ainsi créée participe beaucoup à l'amélioration des sols et favorise la croissance des arbres. Photo M. Vennetier

sur les friches agricoles, le pin d'Alep conquiert depuis quelques dizaines d'années des sites de plus en plus fertiles. Avec une croissance accélérée et de fortes densités, de beaux peuplements se développent sur des surfaces importantes.

Nous devons donc rapidement valoriser cette ressource naturelle qui gagne en quantité comme en qualité, et reste pour l'instant largement sous-exploitée.

Remerciements

L'étude sur laquelle se base cet article a été financée par le Ministère de l'Agriculture, Direction de l'Espace Rural et de la Forêt (DERF). Nous voulons remercier ceux qui ont largement participé aux mesures ou au traitement des données, particulièrement Roland Estève et Yaacoub Nassif.

Remarque :

Le pin d'Alep est donné pour peu longévif : la plupart des auteurs situent sa limite à 150 ans ou moins. On peut remarquer sur les courbes du modèle (Cf. Fig. 2) que la croissance reste soutenue très au-delà de 70 ans, d'autant que les arbres s'écartent significativement de ce modèle par le haut depuis 30 ans (Cf. Fig. 5). Il serait donc possible d'accroître l'âge d'exploitabilité sans perte importante de production. Nous avons mesuré plusieurs arbres de 180 ans, et noté que certains arbres de 130 ans et plus conservaient une croissance significative, et montraient même, comme les plus jeunes, une légère accélération de cette croissance au cours des années 90.

Bibliographie

- Badeau, V. 1995 : Etude dendroécologique du hêtre (*Fagus sylvatica* L.) sur les plateaux calcaires de Lorraine. Influence de la gestion sylvicole. Thèse de doctorat, Université de Nancy I 238p.
- Bert, G. 1992 : Silver fir (*Abies alba* Mill.) shows an increasing long term trend in the Jura Mountain, Lunqua Report 34 (1992) p. 27-29.
- Becker, M.; Bert, G.D.; Bouchon, J.; Picard, J.-F. et Ulrich, E. 1994: Tendances à long terme observées dans la croissance de divers feuillus et résineux du Nord-Est de la France depuis le milieu du XIX^e siècle. Revue Forestière Française, XLVI n°4, p. 335-341
- Brochiero, F. 1997 : Ecologie et croissance du pin d'Alep en Provence calcaire. Cemagref Aix en Provence, ENGREF Nancy, 75 p.
- Brochiero, F.; Chandioix, O.; Ripert, C. et Vennetier, M. 1999 : Autécologie et croissance du pin d'Alep en Provence calcaire. Forêt Méditerranéenne, Tome XX n°2, p. 83-94.
- CNRS, 1975 : Carte climatique détaillée de la France. Ophrys.
- Devaux, J.P. et Le Bourhis, M. 1978 : La limite septentrionale du pin d'Alep en France. Etude dendroclimatique de l'impact des froids exceptionnels. Biologie Ecologie méditerranéenne, t.V,4, p. 133-158
- Duplat, P. et Tran-Ha, M. 1997 : Modélisation de la croissance en hauteur dominante du chêne sessile (*Quercus petrae* Liebl) en France. Variabilité inter-régionale et effet de la période récente (1959-1993). Annales des Sciences Forestières, 54, p. 611-634.

- Gladzel, G. 1999 : Historic forest use in central Europe and its implication to forests ecosystems status. Actes du colloque international (EFI/ECOFOR, Nancy 17-19/05/1998) sur les causes et les conséquences de l'accélération de la croissance des arbres en Europe (sous presse)
- Keller, T. Guiot, J. Tessier, L. 1997 : Climatic effect of atmospheric CO₂ doubling on radial tree growth in south eastern France. Journal of Biogeography 1997, vol 24, n° 6, p. 857-864
- Ladier, J. et Ripert, C. 1996 : Les stations forestières de la Provence cristalline. Cemagref Aix en Provence, 91p.
- Lebourgeois, F. et Becker, M. 1996 : Dendroécologie du pin laricio de Corse dans l'ouest de la France. Evolution du potentiel de croissance au cours des dernières décennies. Annales des Sciences Forestières, n°53 p.931-946.
- Menzel, A et Fabian, P. 1999 : Changes in phenology of trees in Europe. Actes du colloque international (EFI/ECOFOR, Nancy 17-19/05/1998) sur les causes et les conséquences de l'accélération de la croissance des arbres en Europe (sous presse)
- Mirault, J. et Regad, J. 1992 : Le point sur la situation phytosanitaire du pin d'Alep. Forêt Méditerranéenne, t XIII, 3, p. 220-223.
- Nouals, D et Boisseau, B. 1992 : Le pin laricio dans les Cévennes : liaison station-production. Cemagref Aix en Provence, 14 p;
- Nicollussi, K. ; Bortenschlager, S. et Körner C. : increase in tree-ring width in subalpine *Pinus cembra* from central Alps that may be CO₂ related
- Rathgeber, c.; Guiot, j.; Roche, p. et Tessier, L., 1999, Augmentation de productivité du Chêne pubescent en région méditerranéenne française. Annals of Forest Science, n°56 p.211-219
- Rathgeber, c. ; Nicault, a ; Guiot, j. ; Keller, t. ; Guibal, f. And Roche, p. : Simulated response of *Pinus halepensis* forest production to climate change and CO₂ increase using a statistical model (soumis a)
- Ripert, C. et Nouals D. 1998 : Proposition de découpage inter-régional en secteurs écologiques homogènes dans la zone méditerranéenne française. Cemagref Aix en Provence 28 p.+ cartes.
- Ripert, C. et Boisseau, B. 1993 : Ecologie et croissance du cèdre de l'atlas en Provence. Cemagref Aix en Provence, 84 p.
- Serre, F. 1973 : Contribution à l'étude dendroclimatologique du pin d'Alep. Doctorat sciences naturelles, Université Aix-Marseille III, 244 p.
- Serre, F. 1976 : Les rapports de la croissance et du climat chez le pin d'Alep. Acta oecologica plantarum, t 11, 3, p143-171
- Tatoni, T.; Magnin, F.; Bonin, G. ; Vaudour, J. 1994 : Secondary successions on abandoned terraces in calcareous Provence. I. Vegetation and soil. Acta Oecologia plantarum, Vol 15, n°4, p.432-447.
- Vaudour, j. 1991 : Les sols des terrasses de culture en basse Provence calcaire et leur évolution après abandon. Acta Carsologica, XX (1991) , p121-132, Ljubljana.
- Vennetier, M. ; Ripert, C. et Chandieux, O. 1997 : Etude des potentialités forestières de la Provence calcaire. Evaluation à petite échelle sur de grandes surfaces. Cemagref Aix en Provence.34 p
- Vennetier, M ; Hervé J.C. 1999 : Short and long term evolution of *Pinus halepensis* (Mill.) height growth in Provence (France) and its consequences for timber production. Actes du colloque international (EFI/ECOFOR, Nancy 17-19/05/1998) sur les causes et les conséquences de l'accélération de la croissance des arbres en Europe (sous presse)

Résumé

Une étude du pin d'Alep Pinus halepensis (Mill.) dans l'ouest de la Provence, a mis en évidence une accélération continue de sa vitesse de croissance en hauteur depuis plus de 80 ans.

Deux modèles différents, basés d'une part sur l'analyse de tiges et d'autre part sur un indice de potentialités des stations forestières, convergent vers la même estimation : un accroissement moyen de 4.5 cm/an de l'indice de fertilité pour le pin d'Alep, tous sites confondus. Cette accélération moyenne montre des inflexions, qui peuvent être reliées à des variations à court terme du climat (période < 10 ans).

Parmi les causes identifiées ou supposées de l'accélération, se trouvent les changements d'usage du milieu, la remontée biologique et l'amélioration des sols, l'accroissement du taux de CO₂, et les changements à long terme du climat. Dans la conclusion, on évalue les conséquences du phénomène pour la production de bois des forêts provençales de pin d'Alep.

Mots clefs : Sud-est de la France, Provence, *Pinus halepensis*, croissance en hauteur, modèle, changements climatiques, indice de fertilité.

Abstract

A study of Pinus halepensis (Mill.) in Southeast France showed a continuous acceleration of height growth, starting more than 80 years ago.

Two different models, based on (i) stem analysis and (ii) a site fertility index, converged in the same estimation of a 4.5 cm/year average increase of the height index. This acceleration showed variations that could be linked to short term climate variations (period < 10 years).

Identified and suggested causes include changes in land use and forestry practices, soil recovery and improvement, CO₂, rate increase and long term climate changes. Consequences of this trend are assessed for timber production.

Key words : Southeast France, Provence, *Pinus halepensis*, height growth, model, climate change, height index, site index.

Riassunto

Evoluzione a corto e lungo termine della crescita del pino d'Aleppo in Provenza. Conseguenze sulla produzione di legno.

Uno studio del pino d'Aleppo, Pinus halepensis (Mill.) nell'ovest della Provenza, ha messo in evidenza un'accelerazione continua della sua rapidità di crescita in altezza da più di 80 anni.

Due modelli differenti, basati (1) sull'analisi dei fusti e (2) su un indice di potenzialità delle stazioni forestali, convergono verso la stessa stima : un accrescimento medio di 4,5 cm/anno dell'indice di fertilità per il pino d'Aleppo, tutti i siti mescolati. Questa accelerazione media mostra inflessioni che possono essere collegate a variazioni a corto termine del clima (periodo < 10 anni).

Tra le cause identificate o supposte dell'accelerazione, si trovano cambiamenti d'uso dell'ambiente, il risalire biologico e il miglioramento dei suoli, l'accrescimento del tasso di CO₂, e i cambiamenti a lungo termine del clima. Nella conclusione, si valutano le conseguenze del fenomeno per la produzione di legno delle foreste provenzale di pino d'Aleppo.

Parole chiavi : Sud-est della Francia, Provenza, *Pinus halepensis*, crescita in altezza, modello, cambiamenti climatici, indice di fertilità.