

Les changements globaux ont-ils déjà induits des changements de croissance en forêt méditerranéenne ?

Le cas du pin d'Alep et du pin sylvestre
de la Sainte-Baume (Bouches-du-Rhône)

par Bruno VILA et Michel VENNETIER

avec la collaboration de Christian RIPERT, Olivier CHANDIOUX, Eryuan LIANG,
Frédéric GUIBAL et Franck TORRE

Un accroissement des températures, mais également celui des concentrations atmosphériques en CO₂, peuvent être à l'origine d'une augmentation de la croissance et de la productivité de certaines espèces. La forêt risque ainsi de produire davantage, tout irait donc bien serait-on tenter de penser ! Les auteurs nous montrent à travers l'étude du pin d'Alep et du pin sylvestre que les choses ne sont pas si simples que cela.

Introduction

Il est largement accepté que les facteurs climatiques interviennent de manière prépondérante dans la répartition des espèces par le jeu de facteurs limitants. Ainsi, dans le cadre des changements climatiques, l'aire de répartition des espèces pourrait être modifiée (CHUINE et COUR, 1999 ; WALTHER *et al.*, 2002 ; WOODWARD 1987). Si des modifications d'aires de répartition ont déjà été observées chez plusieurs espèces animales, aucune mesure directe n'a encore permis d'estimer les effets des changements climatiques sur les espèces végétales longévives comme les arbres.

Toutefois, à cause des changements climatiques, la longueur de la saison de croissance et les températures minimales (IPCC, 1995) ont déjà évolué. En effet, en Europe, MENZEL et FABIAN (1999) ont observé que la saison annuelle de croissance a augmenté de 10,8 jours depuis le début des années 1960. Sachant que la croissance des arbres des zones tempérées est contrôlée par ces facteurs, les études portant sur les

changements de croissance par l'intermédiaire d'analyses rétrospectives semblent constituer une approche intéressante.

Au cours des dernières décennies, de nombreuses études ont porté sur les changements à court et à long termes des croissances radiale et en hauteur chez de nombreuses espèces dans plusieurs régions de l'hémisphère Nord. En France, ces changements ont été observés sur *Abies alba* Mill. (BECKER *et al.*, 1994; Bert, 1992), *Picea abies* (L.) Karst (BECKER *et al.*, 1994), *Pinus laricio* Poir. (LEBOURGEOIS et BECKER, 1996), *Larix decidua* Mill. (BELINGARD et TESSIER, 1997), *Fagus sylvatica* L. (BADEAU *et al.*, 1995 ; PICARD 1991), *Quercus pubescens* Willd. (RATHGEBER *et al.*, 1999), *Quercus petraea* (Matt.) Liebl. et *Quercus robur* L. (BERGES *et al.*, 2000 ; DHÔTE *et al.*, 2000) quel que soit le type de sylviculture.

Il est généralement accepté que ces changements de croissance sont liés aux changements climatiques et plus particulièrement à une augmentation des températures, mais également à une augmentation des concentrations atmosphériques de CO₂, à une fertilisation par des polluants azotés ou à une combinaison de ces facteurs (IPCC, 1995 ; JARVIS, 1998).

Le nombre limité d'études en région méditerranéenne, basées sur l'étude de la croissance passée ou sur des modélisations, montre des résultats parfois contradictoires entre les espèces considérées ou au sein d'une même espèce.

P. halepensis et *P. sylvestris* sont les deux principales espèces de conifères de la région méditerranéenne française (BARBÉRO et QUÉZEL, 1990). La distribution de *P. sylvestris* est pan-européenne et circum-méditerranéenne pour *P. halepensis*. Ces deux distributions se superposent sur une bande étroite dans quelques montagnes provençales. Là, la limite entre les deux espèces correspond exactement à la limite des bioclimats méso-méditerranéens et supra-méditerranéens (BARBÉRO *et al.*, 1998). Pour *P. halepensis* Mill., VENNETIER et HERVÉ (1999) ont mis en évidence une augmentation de la vitesse de croissance en hauteur. RATHGEBER *et al.* (2005) n'ont pas mis en évidence de tendance significative dans l'épaisseur des cernes, mais ont trouvé une augmentation de la densité du bois initial et une diminution de la densité du bois final et de la densité maximale. Pour *P. sylvestris* L. aucune étude ne s'est intéressée aux tendances de croissance passées. Des tendances de croissance en nette diminution ont cependant été modélisées dans le cadre des changements climatiques particulièrement pour les populations en limite de répartition d'aire (KELLER *et al.*, 1997, 2000).

L'objectif de cette étude est donc d'estimer les tendances de la croissance radiale de ces deux espèces poussant côte à côte sur le massif de la Sainte-Baume, le long d'un gradient altitudinal, afin d'envisager comment pourrait évoluer la forêt dans le cadre des changements climatiques.

Matériels et méthodes

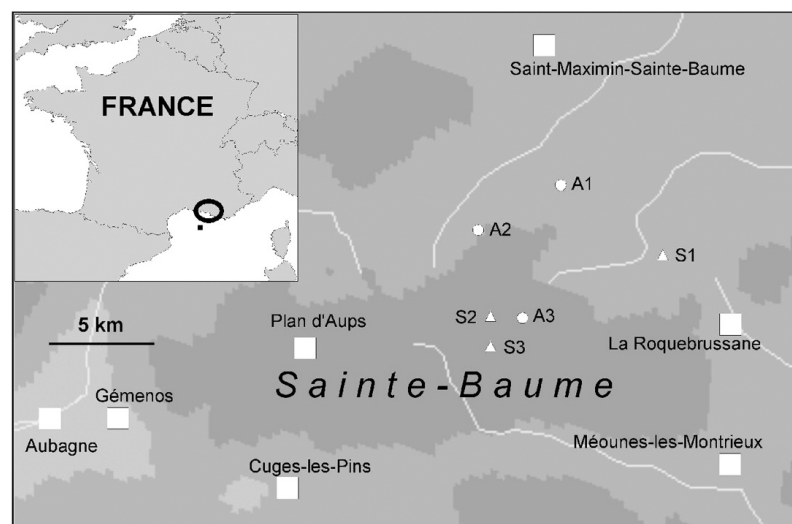
Zone d'étude

L'étude a porté sur des placettes situées le long d'un gradient altitudinal (Cf. Tab. I) sur la face nord de la Sainte-Baume (Cf. Fig. 1). Pour *P. sylvestris*, trois placettes ont été notées de S1 à S3 et pour *P. halepensis* de A1 à A3. Le climat peut y être défini comme méditerranéen humide avec des hivers frais et des étés chauds comprenant une période de sécheresse allant de 2 à 5 mois. Sur les

Tab. I (ci-dessous) :
Localisation des placettes

Fig. 1 (en bas) :
Placettes échantillonnées sur le massif de la Sainte-Baume et stations météorologiques. Les placettes de *Pinus halepensis* sont notées de A1 à A3 et celles de *Pinus sylvestris* de S1 à S3. Les variations de gris indiquent les variations d'altitude.

Espèce	Placettes	Longitude	Latitude	Altitude (m)
<i>P. sylvestris</i>	S1	5°56'	43°22'	430
<i>P. sylvestris</i>	S2	5°50'	43°21'	675
<i>P. sylvestris</i>	S3	5°50'	43°20'	955
<i>P. halepensis</i>	A1	5°50'	43°24'	380
<i>P. halepensis</i>	A2	5°51'	43°23'	510
<i>P. halepensis</i>	A3	5°50'	43°21'	650

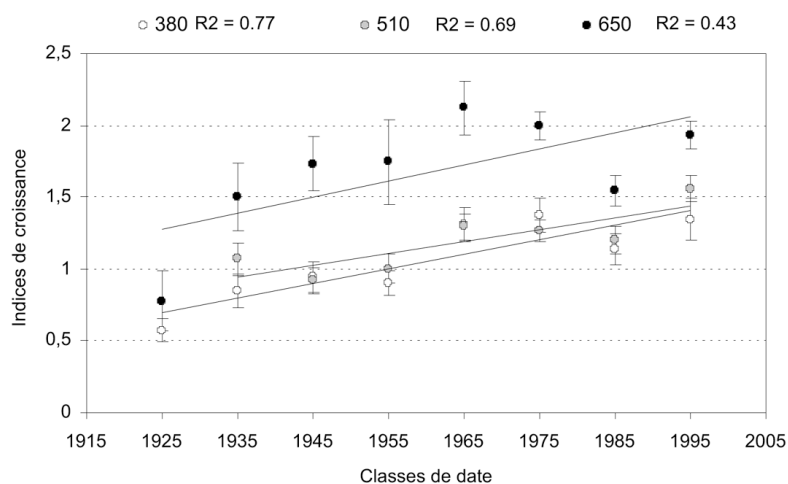


trente dernières années à Plan d'Aups (altitude 679 m), la moyenne des températures annuelles est de 10,3 °C. La moyenne annuelle des précipitations est de 826 mm, mais est très irrégulière d'une année sur l'autre. Les événements climatiques exceptionnels comme les fortes gelées (minimum entre -10 et -25 °C en janvier et/ou février), les vagues de chaleur (maximum dépassant les 38 °C en juillet et/ou août) ainsi que de longues sécheresses (jusqu'à 8 mois) ont été observées au cours du siècle dernier. Les tendances climatiques observables sur le massif sont conformes à celles décrites par LEBOURGEOIS *et al.* (2001) en France. Au niveau des stations météorologiques entourant les placettes étudiées, les températures minimales ont augmenté de 0,8°C, les températures maximales ont augmenté de 1,8°C, alors qu'aucune tendance dans les précipitations n'a été observée. Toutes les placettes sont caractérisées par une roche-mère calcaire recouverte d'une altérite ou d'un colluvium plus ou moins épais.

Acquisition et traitement des données "cernes"

Pour chaque espèce, trois placettes de quinze arbres ont été échantillonnées. Trois carottes ont été prélevées par arbre et ont été préparées et mesurées selon le protocole classique en dendrochronologie (FRITTS, 1976 ; STOKES et SMILEY, 1968). Pour étudier les tendances de croissance, les séries de cernes ont été transformées. Afin de supprimer l'effet géométrique lié à la croissance en diamètre (RATHGEBER *et al.*, 1999), les séries ont été converties en surface à l'aide du logiciel PPPhalos (<http://www.imep-cnrs.com/> ; GUIOT et GOEURY, 1996). Afin d'éliminer les tendances d'âge, les séries de cernes ont été indexées en les divisant par une courbe régionale de standardisation (ESPER *et al.*, 2003). Enfin, pour atténuer les variations interannuelles, liées à des événements climatiques extrêmes (notamment l'effet des années exceptionnelles 1929, 1956, 1985, 1986 et 1987 chez le pin d'Alep) qui perturbent les tendances à long terme, nous avons calculé des indices moyens de croissance (classe de date de 10 ans) exprimés en surface pour chaque échantillon (BERGÈS *et al.*, 2000).

Nous avons ainsi obtenu pour chaque échantillon une série d'indices moyens par



classe de date auxquels nous avons adjoint un intervalle de confiance à 95%. Pour apprécier la variation de la croissance au cours du temps et faciliter les comparaisons, nous avons ajusté la série d'indices moyens par une régression linéaire qui rend mieux compte de la tendance à long terme. La significativité des tendances de croissance a été testée à l'aide d'un test de Fisher.

Fig. 2 : Tendances de croissance radiale (régression linéaire au sein des classes de dates et R2 associé) aux différentes altitudes considérées chez *Pinus sylvestris*.

Résultats

Des tendances de croissance significatives ont été observées pour les deux espèces (F-test, $P < 0.001$). Pour *P. sylvestris*, les tendances de croissance diffèrent avec l'altitude (Cf. Fig. 2). Pour certaines placettes situées à la base du massif, la croissance a augmenté, pour une autre située en altitude, elle a diminué. Pour *P. halepensis* quelle que soit l'altitude considérée, la croissance a augmenté (Cf. Fig. 3).

Discussion

De nombreuses études ont mis en évidence de telles tendances de croissance radiale un peu partout en Europe au cours des dernières décennies. Néanmoins, cette étude apporte des informations nouvelles pour la zone méditerranéenne où ces observations faisaient défaut. Même si des biais d'ordre méthodologique peuvent être avancés, ils ne

peuvent expliquer les tendances observées à eux seuls et encore moins les tendances opposées.

Seul des changements au niveau des facteurs environnementaux, comme les facteurs climatiques et en particulier l'élévation des températures, l'augmentation de CO₂ atmosphérique ou l'augmentation des dépôts azotés, peuvent expliquer les modifications de croissance observées.

Les tendances positives de croissance sont souvent attribuées à la fertilisation directe par le CO₂ atmosphérique mais les études sont souvent contradictoires. Par exemple, KILPELÄINEN *et al.* (2003) ont montré l'existence d'une réponse sur des arbres jeunes ou aucune réaction, alors que RATHGEBER *et al.* (2003) ont montré la synergie existant entre les changements climatiques et l'augmentation du CO₂ atmosphérique par modélisation. Il en résulte que l'augmentation du CO₂ atmosphérique ne semble pas avoir d'effet seul.

L'azote qui représente un autre facteur limitant pour la croissance a fortement augmenté sous la forme de dépôts qui excèdent par endroits les capacités naturelles de fixation jouant ainsi un rôle de fertilisant. Cependant, ces effets sont spécifiques à certaines régions auxquelles la zone d'étude n'appartient pas (INERIS, 2004).

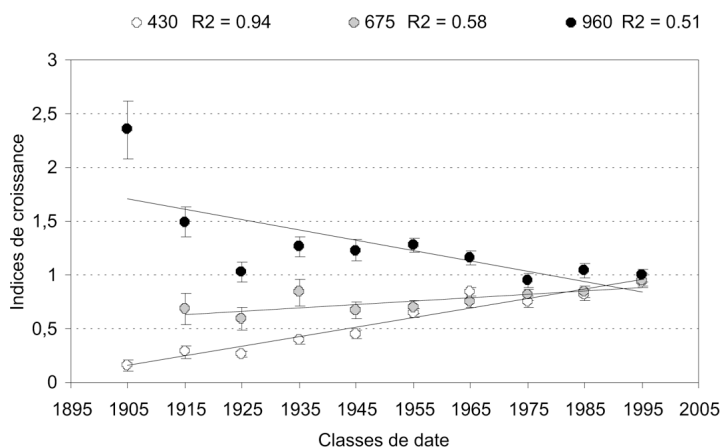
Du point de vue climatique, la croissance de *P. sylvestris* est stimulée par les précipitations d'avril à septembre et réduite par les fortes températures maximales et moyennes de mai, juin et juillet (TESSIER, 1984). La croissance de *P. halepensis* est influencée par le cumul des précipitations du mois d'octobre (année n-1), de mai et de juin et les températures moyennes des mois de mars et d'avril qui ont un effet positif sur la croissance. On

note cependant une grande sensibilité de *P. halepensis* aux grands froids et plus particulièrement aux minimorums de janvier à mars qui se traduisent par de très fortes diminutions de croissance, voire par des cernes manquants. Au niveau des stations météorologiques situées autour de la Sainte-Baume, l'augmentation des températures minimales correspond à une augmentation altitudinale de 133 m alors que l'augmentation des températures maximales correspond à une augmentation altitudinale de 300 m. De tels changements influencent donc la croissance des deux espèces considérées et expliquerait en partie les tendances observées.

Pour *P. sylvestris*, le patron de réponse est complexe et varie avec l'altitude. Dans notre étude, où les modifications climatiques correspondent à une détérioration des conditions de croissance avec une augmentation des températures estivales et de la sécheresse, la diminution de croissance des arbres au dessus de 700 m d'altitude apparaît cohérente. Par contre, l'augmentation de croissance des arbres au-dessous de 700 m d'altitude est surprenante. L'augmentation des températures minimales doit favoriser la croissance des arbres en dessous de 700 m d'altitude en leur permettant d'utiliser les réserves hydriques accumulées pendant la période automnale et hivernale. A haute altitude, la décroissance observée confirme les prédictions de KELLER *et al.* (1997, 2000).

Pour *P. halepensis*, l'augmentation des températures minimales en janvier et février et de mars à juin pourrait rallonger sa période de croissance. Les automnes plus chauds semblent lui permettre une seconde période de croissance. L'augmentation des températures maximales estivales n'affectent pas *P. halepensis* parce qu'il est en phase de repos pendant cette période (NICAULT, 1999). Les tendances positives de croissance observées sont en accord avec celles obtenues par VENNETIER et HERVÉ (1999) sur la croissance en hauteur.

Fig. 3 :
Tendances de croissance radiale (régression linéaire au sein des classes de dates et R2 associé) aux différentes altitudes considérées chez *Pinus halepensis*.



Conclusion

Cette étude met en évidence que les changements globaux ont déjà induit des changements de croissance chez les deux principales espèces de conifères de la région méditerranéenne française. Deux patrons de

croissance différents face au changement climatique se distinguent. La première espèce, *P. halepensis*, se caractérise par une augmentation de croissance quelle que soit l'altitude considérée. La seconde espèce, *P. sylvestris*, se caractérise par une tendance de croissance variant en fonction de l'altitude. Cependant d'autres études en cours sur le pin sylvestre dans le Haut-Var montrent des diminutions de croissance. Elles semblent indiquer l'existence d'une tendance générale du pin sylvestre à une diminution de croissance en région méditerranéenne française.

Remerciements

Cette étude a été financée par le Groupement d'intérêt public écosystèmes forestiers (Ecofor), la Région Provence-Alpes-Côte d'Azur et le Cemagref d'Aix-en-Provence. Les auteurs remercient les propriétaires forestiers privés.

Références

- Badeau V., Dupouey J.L., Becker M., and Picard J.F., Long-term growth trends of *Fagus sylvatica* L. in northeastern France. A comparison between high and low density stands, *Acta Oecol.* 16, 5 (1995) 571-583.
- Barbéro M., Loisel R., Quézel P., Richardson D.M. and Romane F., Pines of the Mediterranean basin, in: Richardson D.M. (Ed.), *Ecology and biogeography of Pinus*, Cambridge University Press, Cambridge, 1998, pp 153-170.
- Barbéro M. et Quézel P., La déprise rurale et ses effets sur les superficies forestières dans la région Provence-Alpes-Côte d'Azur, *Bull. Soc. Linn. Prov.* 41 (1990) 77-88.
- Becker M., Bert G.D., Bouchon J., Picard J.F., and 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 XIX^e siècle, *Rev. For. Fr.* XLVI-4 (1994) 335-341.
- Belingard C., Tessier L. Etude dendrochronologique comparée de vieux peuplements de *Larix decidua* Mill. dans les Alpes françaises du sud. *Dendrochronologia*, 11, (1997) 69-78.
- Bergès L., Dupouey J.L., Franc, A., Long-term changes in wood density and radial growth of *Quercus petraea* Liebl. in northern France since the middle of the nineteenth century, *Trees-Struct. and Funct.* 14 (2000) 398-408.
- Bert G.D., Influence du climat, des facteurs stationnels et de la pollution sur la croissance et l'état sanitaire du sapin pectiné (*Abies alba* Mill.) dans le Jura. Etude phytoécologique et dendrochronologique, Thèse de Doctorat, Université Henri-Poincaré, Nancy, 1992.
- Chuine I. and P. Cour, Climatic determinants of budburst seasonality of temperate-zone trees. *New Phytol.* 143 (1999) 339-349
- Dhôte J.F., Dupouey J.L., Bergès L., Modifications à long terme, déjà constatées, de la productivité des forêts françaises, *Rev. For. Fr.* LII. numéro spécial (2000) 37-48.
- Esper J., Cook E.R., Krusic P.J., Peters K., and Schweingruber F.H., Tests of the RCS method for preserving low frequency variability in long tree-ring chronologies. *Tree-ring Research*, 59, 2, (2003) 81-98.
- Fritts H.C., *Tree ring and climate*, Academic Press, New York, 1976.
- Guiot J. and Goeury C., PPPBase, a software for statistical analysis of paleoecological and paleoclimatological data, *Dendrochronologia*, 14 (1996) 295-300.
- IPCC, *Climate Change 1995. The Science of Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, 1996.
- INERIS, *Effet des dépôts atmosphériques de soufre et d'azote sur les sols et les eaux douces en France*, ministère de l'Ecologie et du Développement Durable, Paris, 2004.
- Jarvis P.G., *European Forest and Global Change*. Cambridge University Press, Cambridge, 1998.
- Keller T., Guiot J., Tessier L., Climatic effect of atmospheric CO₂ doubling on radial tree-growth in southeastern France, *J. Biogeogr.* 24 (1997) 857-864.
- Keller T., Edouard J.-L., Guibal F., Guiot J., Tessier L., Vila B., Impact d'un scénario climatique de réchauffement global sur la croissance des arbres, *C. R. Biol.* 323, 10 (2000) 913-924.
- Kilpeläinen A., Peltola H., Ryyppö A., Sauvala K., Laitinen K. and Kellomäki S., Wood properties of Scots pines (*Pinus sylvestris*) grown at elevated temperature and carbon dioxide concentration. *Tree Physiol.* 23 (2003) 889-897.
- Lebourgeois F., Granier A., and Bréda N., Une analyse des changements climatiques régionaux en France entre 1956 et 1997. Réflexions en terme de conséquences pour les écosystèmes forestiers. *Ann. For. Sci.* 58 (2001) 733-754.
- Lebourgeois and Becker M., Dendroécologie du pin laricio de Corse dans l'Ouest de la France. Evolution du potentiel de croissance au cours des dernières décennies. *Ann. Sci. For.* 53 (1996) 931-946.
- Menzel A., and Fabian P., Growing season extended in Europe. *Nature* 397 (1999) 659.
- 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, Université d'Aix-Marseille III, Marseille, 1999.
- Picard J.F., Evolution de la croissance radiale du hêtre dans les Vosges. Premiers résultats sur le versant lorrain. *Ann. Sci. For.* 52 (1995) 11-21.
- Rathgeber C., Guiot J., Roche P, Tessier L., Augmentation de productivité du chêne pubescent en région méditerranéenne française, *Ann. For. Sci.* 56 (1999) 211-219.

Bruno VILA (a*)
Michel VENNETIER (b)

avec la collaboration de
Christian RIPERT (b)
Olivier CHANDIOUX (b)
Eryuan LIANG (c)
Frédéric GUIBAL (a)
Franck TORRE (a)

a - Institut méditerranéen d'écologie et de paléoécologie
CNRS UMR 6116
Faculté des Sciences et Techniques
de Saint-Jérôme
Avenue Escadrille
Normandie-Niemen
13397 Marseille
cedex 20, France

b - Cemagref
UR écosystèmes méditerranéens et risques
Groupement d'Aix-en-Provence
Le Tholonet - BP 31
13612 Aix-en-Provence, France

c - The Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences
P.O.Box 2871
Beijing 100085
China

* auteur correspondant :
Tél. : 04 91 28 81 21
Fax : 04 91 28 87 07
Mél : bruno.vila@univ-mrs.fr

- Rathgeber C., Nicault A., Kaplan J.O. and Guiot J., Using a biogeochemistry model in simulating forests productivity responses to climatic change and [CO₂] increase: example of *Pinus halepensis* in Provence (south-east France), *Ecol. Model.* 166, 3 (2003) 239-255.
- Rathgeber C., Nicault A. and Guiot J., Evolution de la croissance radiale du pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.) en Provence calcaire (Sud-Est de la France). *Ecologia mediterranea* 31, 1 (2005) 75-82.
- Stokes M.A. and Smiley T.L., An introduction to tree-ring dating. Chicago, Univ. of Chicago Press, 1968.
- Tessier L., Dendroclimatologie et écologie de *Pinus sylvestris* L. et *Quercus pubescens* Willd. dans le Sud-Est de la France. Thèse d'Etat, Université d'Aix-Marseille III, Marseille, 1984.
- Vennetier M., Hervé J.C., Short and long term evolution of *Pinus halepensis* (Mill.) height growth in Provence, and its consequences for timber production. in: Timo Karjalainen T., Spiecker H., Laroussine O., (Ed.), Tree growth acceleration in Europe, Nancy mai 1998. EFI Proceedings 27 1999, pp 263-265.
- Walther G.R., Post E., Convey P., Menzel A., Parmesan C., Beebee T.J., Fromentin J-M., Hoegh-Guldberg O. and Bairlein F., Ecological responses to recent climate change. *Nature* 416 (2002) 389-395.
- Woodward F.I., Climate and plant distribution. Cambridge University Press, Cambridge, U.K., 1987.

Résumé

Il est admis que les facteurs climatiques (températures et précipitations) sont en partie responsables de la répartition des espèces et que dans le cadre de changements climatiques, ces répartitions peuvent varier. Chez les espèces longévives, pour lesquelles on ne peut pas effectuer de mesures directes afin d'appréhender ces modifications, nous avons étudié les changements de croissance à l'aide d'une analyse des séries de cernes. Dans la zone méditerranéenne française, où les changements climatiques sont caractérisés par une augmentation des températures, nous avons utilisé un gradient altitudinal le long du flanc nord de la Sainte-Baume (Bouches-du-Rhône, France) où la répartition des deux espèces, *Pinus sylvestris* and *Pinus halepensis*, se superpose. Deux patrons de croissance différents ont été identifiés. La croissance de *P. halepensis* a augmenté quelle que soit l'altitude considérée indiquant que le changement climatique a amélioré les conditions de croissance de l'espèce à sa limite de répartition. Chez *P. sylvestris*, des tendances de croissance opposées en fonction de l'altitude ont été mises en évidence. Cependant d'autres études au niveau régional mettent en évidence une tendance générale de décroissance pouvant conduire au dépérissement des peuplements les moins adaptés.

Changement global / limite bioclimatique / croissance radiale / *Pinus halepensis* / *Pinus sylvestris*

Summary

**Have global changes already brought change to growth in Mediterranean woodlands ?
The case of Aleppo and Scotch pines at Sainte-Baume (Bouches-du-Rhône, S.-E. France)**

It is agreed that climatic regimes influence species distribution through temperature and precipitation tolerance and that with climate change, a species' range will be altered. In the absence of direct measurement for long-lived tree species, we studied growth changes by means of retrospective analysis of tree-ring series. In the French Mediterranean region where climate change was characterized by increases temperatures, we used an altitudinal transect on the north-facing slope of the Sainte-Baume mountain (Bouches-du-Rhône, France) where the distribution of two species, *Pinus sylvestris* and *Pinus halepensis*, overlaps. Two growth patterns were identified. For *P. halepensis*, growth has increased whatever the altitude considered, indicating that climate change has improved growth conditions of trees at their bioclimatic limit. For *P. sylvestris*, unexpected opposite trends were evidenced, depending on altitude. However, other studies in the south-east of France have revealed a general negative growth trend that, in the most unfavourable cases, can lead to the progressive withering of the less adapted stands.

Global change / bioclimatic limit / radial growth / *Pinus halepensis* / *Pinus sylvestris*