

Impact du changement climatique sur la productivité forestière et le déplacement d'une limite bioclimatique en région méditerranéenne française

Michel Vennetier ^a, Bruno Vila ^b, Er-Yuan Liang ^c, Frédéric Guibal ^b, Christian Ripert ^a et Olivier Chandoux ^a

Si les effets du changement climatique global semblent de plus en plus avérés sur les grands équilibres de la planète, il est encore peu fréquent que des travaux scientifiques montrent des effets sensibles sur des essences forestières familières de nos régions tempérées et méditerranéennes. Tel est le but de l'étude qui est présentée ici pour le pin d'Alep et le pin sylvestre. Après une description du cadre méthodologique, les auteurs analysent l'interaction entre climat et réserve hydrique du sol sur la croissance des arbres et expliquent pourquoi le réchauffement climatique devrait produire des effets significatifs sur la productivité forestière à court terme et compromettre l'avenir de surfaces occupées par le pin sylvestre en région méditerranéenne.

L'accélération de la croissance des arbres au cours du XX^e siècle fait l'objet de résultats concordants dans tout l'hémisphère Nord (Diaz *et al.*, 1997). Selon les espèces et les régions, l'origine de cette accélération remonte de quelques dizaines d'années à un peu plus d'un siècle. En Europe, une augmentation de l'accroissement annuel moyen des arbres a été notée, tous types de traitements sylvicoles confondus, pour le diamètre ou la hauteur de la plupart des essences forestières (Spiecker *et al.*, 1996). En France, le même phénomène a été constaté sur le sapin pectiné (*Abies alba* Mill) et l'épicéa (*Picea abies* (L.), Kars. ; Bert, 1992 ; Becker *et al.*, 1994 a), le hêtre (*Fagus sylvatica* L. ; Badeau., 1995 ; Picard, 1995), les chênes à feuillage caduc (Becker *et al.*, 1994 b), en région méditerranéenne sur le chêne pubescent (*Quercus pubescens* Willd. ; Rathgeber *et al.*, 1999), le pin laricio (*Pinus laricio* Poir. ; Lebourgeois et Becker, 1996), le mélèze (*Larix decidua* Mill. ; Belingard *et al.*, 1996) et le pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill. ; Vennetier et Hervé, 1999).

Des effets dus à des modifications de l'environnement

La communauté scientifique s'accorde pour interpréter ces variations de croissance comme le

résultat de plusieurs changements majeurs dans l'environnement et notamment :

- les changements climatiques (Berger, 1992 ; Ramaswamy, 2001) dus à l'augmentation de la concentration des gaz à effet de serre parmi lesquels figure le CO₂ (Prentice, 2001 ; Keeling et Worf, 2001) ;
- un effet direct fertilisant du CO₂ atmosphérique (Kirsbaum et Fischlin, 1996) ;
- un enrichissement des sols en matières azotées issues de la pollution atmosphérique (Nellmann et Thomsen, 2001) ;
- de la reconstitution de sols dégradés après abandon de pratiques de surexploitation (Gladzel, 1999) ;
- et de façon globale comme une combinaison de ces facteurs.

Pour la zone méditerranéenne, les études portant sur les variations de croissance des arbres sont plus rares que dans le reste de la France et de l'Europe. Les résultats obtenus à l'IMEP¹ montrent que les réactions significatives de la croissance radiale se produisent dans les peuplements localisés en limite de leur aire d'extension géographique (Keller *et al.*, 1997 a et b ; Rathgeber *et al.*, 2000 a et b). Pour la croissance en hauteur, des

1. Institut méditerranéen d'écologie et de paléoécologie.

Les contacts

a. Cemagref, UR Écosystèmes méditerranéens et risques, 3275, route de Cezanne, CS 40061, 13182 Aix-en-Provence Cedex 5

b. Institut méditerranéen d'écologie et de paléoécologie, CNRS, UMR 6116, boîte 421 bis, 13397 Marseille Cedex 20

c. Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing, Chine

2. Unité de recherche « Écosystèmes méditerranéens et risques » (EMAX).
3. Le GIP ECOFOR est un groupement d'intérêt public, créé en 1993 ayant pour objet d'animer des programmes de recherche sur les écosystèmes forestiers et leur gestion ; il regroupe neuf organismes scientifiques, techniques ou professionnels.

études du Cemagref montrent une accélération au cours des dernières dizaines d'années (cèdre de l'Atlas – Ripert et Boisseau, 1993 ; pin laricio – Nouals et Boisseau, 1992 ; pin sylvestre – Vila *et al.*, 2001) ou sur plus de 80 ans (pin d'Alep – Vennetier et Hervé, 1999).

Le climat méditerranéen est caractérisé par une sécheresse estivale, principale contrainte pour la végétation (Daget, 1977) et qui pourrait devenir critique avec les changements climatiques prévus (Hoff et Rambal, 2000). Les années très chaudes qui se sont succédé depuis 1998, avec leur paroxysme en 2003, semblent en effet avoir mis à mal la végétation en France (Pauly et Belrose, 2005), y compris en région méditerranéenne.

Cet article présente un programme de recherche commun entre le Cemagref² et l'IMEP, destiné à évaluer l'impact à long terme du changement climatique sur la végétation méditerranéenne, financé par ECOFOR³, le conseil régional PACA et le Cemagref. Elle résume le rapport final (Vila et Vennetier, 2003) d'une partie du programme traitant des changements de productivité du pin d'Alep et du pin sylvestre, enrichi des premiers résultats des travaux en cours sur l'impact de la canicule de l'année 2003.

Après avoir situé le contexte de ce programme, l'article développe les points originaux des protocoles de recherche utilisés, puis présente les résultats globaux qui valident et confortent notre approche méthodologique. Les résultats scientifiques, faisant l'objet de publications dans des revues spécialisées, ne sont abordés ensuite que de façon synthétique pour nourrir la discussion sur les enjeux et perspectives de ces travaux.

Matériel et méthodes

Les contraintes de l'évaluation des relations climat-croissance des arbres

L'analyse de l'impact des changements globaux d'environnement sur les essences forestières peut se concevoir en réalisant des mesures dans l'ensemble de leur aire de répartition, mais elle se heurte à plusieurs contraintes :

- la lenteur du cycle de reproduction et la faible mobilité des essences forestières à l'échelle des temps d'observation de la recherche. En particulier, le déplacement des aires de répartition des essences ne saurait suivre naturellement le rythme des variations annoncées du climat au cours de ce siècle ;

- la variabilité spatiale du climat. Les interactions et les variations relatives de régime entre pluies et températures ne permettent pas de comparer facilement des peuplements situés à des distances de plusieurs centaines ou même simplement parfois quelques dizaines de kilomètres ;

- la variabilité génétique des essences. Cette variabilité peut entraîner des réponses et des capacités adaptatives différenciées, suivant les régions, aux mêmes changements d'environnement ;

- l'interaction forte entre climat et fertilité des sites (particulièrement le bilan hydrique) dans la réponse des essences aux changements climatiques.

Pour contourner ces difficultés, au moins par rapport au réchauffement du climat, nous avons conçu et mis en place des dispositifs spécifiques

Choix méthodologiques

Notre approche est basée sur la dendroécologie : l'étude et la modélisation des cernes de croissance des arbres et de leurs relations avec l'environnement. Elle permet, grâce à une analyse au pas de temps annuel et grâce à la longévité des arbres de « remonter le temps » sur plusieurs dizaines, voire plusieurs milliers d'années. Dans l'encadré 1, nous expliquons pourquoi nous n'avons pas intégré la mesure de croissance en hauteur des arbres.

Encadré 1

À propos de la croissance des arbres en hauteur

La croissance en hauteur des arbres ne permet pas d'établir des relations assez précises entre climat et productivité des arbres : d'une part, elle est fréquemment sujette à des accidents (bris de neige ou de vent), ce qui ne permet d'évaluer les changements de productivité que de façon moyenne sur des pas de temps longs ; d'autre part, la croissance annuelle en hauteur d'un résineux dépend autant du climat de l'année précédente que du climat de l'année en cours, ce qui complique la modélisation ; enfin la mesure des accroissements annuels en hauteur est difficile et beaucoup plus consommatrice de temps sur les vieux arbres que les mesures de cernes.

Nos dispositifs sont conçus pour analyser les variations de productivité et d'état sanitaire d'une ou plusieurs essences en lien avec les changements de température, en éliminant en grande partie les variations de régime de pluies et de variabilité stationnelle. Ils répondent aux critères suivants :

- homogénéité des substrats, des sols et de la topographie le long d'un transect altitudinal⁴ ;
- transect situé dans un versant présentant un fort dénivelé sur une courte distance, ce qui limite la variabilité du régime des pluies, même si la pluviométrie annuelle peut varier légèrement entre le haut et le bas du versant ;
- transect recoupant si possible la limite entre les aires de répartition de deux essences ;
- multiplication de petites placettes traitées en groupes glissants pour lisser les variations aléatoires ;
- combinaison de ces dispositifs avec des suivis à plus vaste échelle (régionale à nationale ou plus) ;
- comparaison si possible de différentes classes de bilan hydrique en rajoutant, à plusieurs niveaux d'un transect, des placettes supplémentaires aux sols nettement plus ou nettement moins favorables.

Pour limiter les travaux de terrain et de laboratoire très coûteux en temps, tout en assurant une bonne représentativité statistique et en améliorant la résolution spatiale du dispositif, les transects comprennent :

- quelques grandes placettes (15 arbres minimum, le standard en dendroécologie), situées aux altitudes où nous avons ajouté au transect des placettes de plusieurs niveaux de bilan hydrique, stationnel ;
- des placettes intermédiaires plus petites (5 à 7 arbres) mais plus nombreuses, traitées 3 par 3 en moyenne glissante avec les grandes. À travail équivalent, cette conception facilite le choix de sites très homogènes, permet de lisser une partie des variations aléatoires non liées au climat et donne plus de chance d'évaluer la progressivité des phénomènes et les effets de seuil qu'avec un nombre plus limité de grandes placettes. Le choix particulièrement soigné des placettes pour le bilan hydrique stationnel permet de rendre les petites placettes successives très comparables et donc assimilables 3 par 3 à une grande placette.

Trois de ces dispositifs ont été installés ou sont en cours d'installation en France, en Tunisie et au nord-est de la Chine.

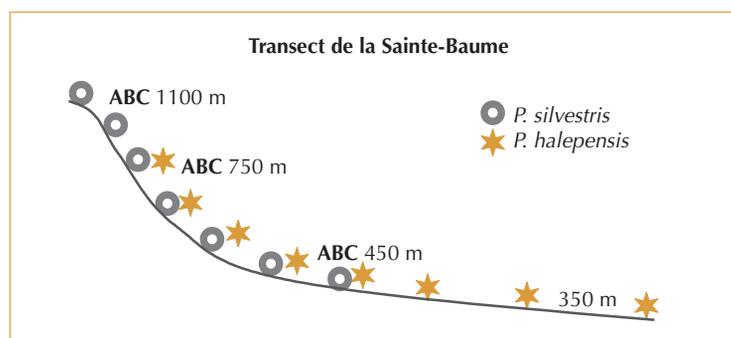
Le premier (figure 1), installé en 2001 dans le massif de la Sainte-Baume (Bouches-du-Rhône), sert à étudier le déplacement de la limite entre les aires du pin sylvestre (*Pinus sylvestris* L.) et du pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill) et l'évolution de leur productivité depuis le début du XX^e siècle. Il a permis de mettre en évidence l'intérêt et la pertinence de la méthode. Sur ce site, pin sylvestre et pin d'Alep sont mélangés dans une bande étroite (quelques kilomètres de large), à l'extrême limite de leur aire de répartition respective. Ces deux pins sont les conifères dominants de la zone méditerranéenne française, respectivement dans l'arrière-pays et le secteur côtier.

Nous étudions actuellement, sur les mêmes placettes, l'impact direct et les effets différés de la canicule 2003, pour améliorer l'interprétation de tendances à long terme et les modèles de relation climat-croissance. Quelques placettes de pin maritime, pin pignon et cèdre, ont complété le dispositif pour ces travaux.

Chaque arbre par placette fait l'objet de trois prélèvements de carottes à la tarière de Pressler, de l'écorce jusqu'au cœur. Les largeurs de cernes de ces carottes, après séchage, ponçage et interdatation (mise en correspondance des cernes et des années), sont mesurées au 1/100^e de mm avec un mesureur microscopique Eklund.

L'analyse des données et la modélisation des relations climat-croissance ont utilisé d'une part, des méthodes classiques de la dendroéco-

4. Un transect est un alignement régulier de sites ou points de mesures dans le gradient d'une variable dont on souhaite mesurer l'effet (ici la température moyenne annuelle liée à l'altitude).



▲ Figure 1 – Coupe transversale sur le versant nord de la Sainte-Baume. Les placettes du transect principal sont homogènes pour la fertilité et le bilan hydrique. À trois altitudes différentes, des placettes complémentaires sont choisies à trois niveaux contrastés de bilan hydrique (notés A, B, C).

5. Régression PLS : en anglais, *Partial Least Squares*.

Cette méthode permet de réaliser une régression multiple quand les techniques usuelles sont inefficaces : variables explicatives corrélées, hypothèse de normalité non remplie, nombre d'observations faible par rapport au nombre de variables explicatives, etc.

logie comme les fonctions de réponse (Guiot, 1982), d'autre part, des méthodes innovantes en la matière : régression PLS⁵ et réseaux de neurones.

Les variations de productivité des différentes placettes dans le temps ont pu être calculées et comparées après avoir soustrait les tendances liées à l'âge. Pour cela, un modèle général d'évolution de la productivité avec l'âge pour chaque espèce a été réalisé en moyennant les courbes de productivité de l'ensemble des placettes des bases de données de l'IMEP et du Cemagref sur la région méditerranéenne, soit plus de 700 arbres de tous âges. En soustrayant ce modèle général aux valeurs de chaque placette du dispositif, on ne conserve que les variations propres du dispositif par rapport à la moyenne de l'espèce, et on peut mettre en évidence des variations temporelles liées aux changements climatiques.

Résultats principaux

Sur le plan méthodologique

L'essai de la Sainte-Baume a permis de mettre en évidence l'intérêt de ce type de dispositif pour évaluer la variabilité fine de la réponse des espèces et leur adaptabilité en fonction du gradient thermique et du bilan hydrique. À altitude identique, la réactivité au climat et aux changements d'environnement pour une espèce donnée dépend beaucoup du bilan hydrique local (figure 2).

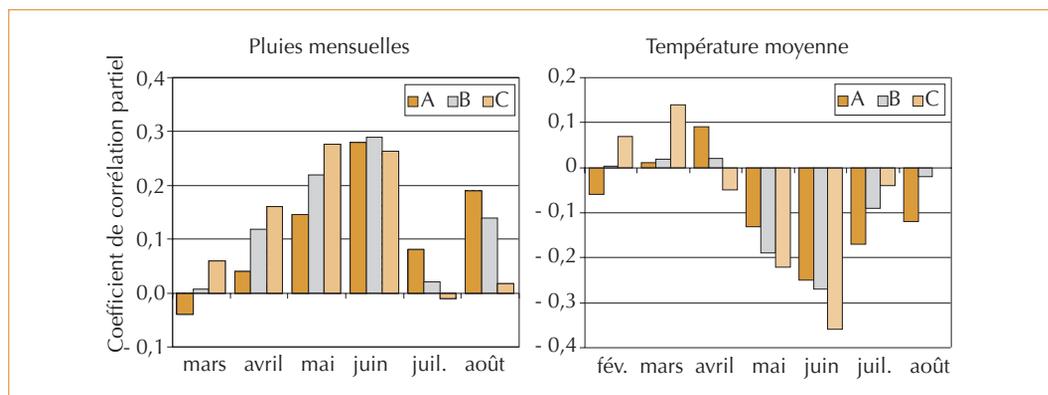
Avec un bilan hydrique stationnel défavorable (faible capacité de stockage de l'eau), les arbres

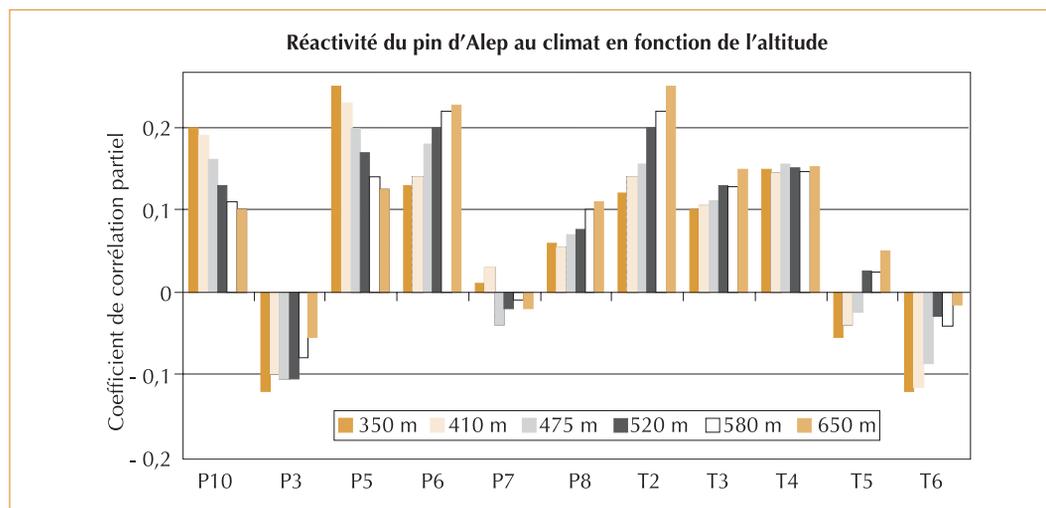
sont plus sensibles aux pluies du début du printemps, car ils ne bénéficient pas longtemps des réserves de l'hiver. Se mettant en forte dormance dès le début de l'été, ils sont insensibles au climat de l'été et de l'automne. Sur les bonnes stations, où le sol et la topographie permettent de conserver longtemps les réserves de pluies d'hiver, la croissance des arbres dépend moins des premières pluies de printemps, peut se poursuivre en début d'été et peut reprendre après une courte pause estivale lorsque la fin de l'été est favorable.

L'analyse par moyenne glissante des petites placettes a été validée par comparaison avec les résultats des grandes placettes correspondantes. Elle a permis de visualiser les variations de réponse des arbres au climat en fonction du gradient thermique le long du versant. Sur la figure 3, on observe que ces variations de réponse aux variables climatiques (pluies et températures mensuelles) suivent pour la plupart un gradient régulier et surtout qu'elles sont significatives (seuil de 5 %) pour des faibles variations d'altitude : la différence entre les altitudes moyennes des groupes extrêmes n'est que de 300 m, correspondant à une variation de 1,8 °C de température moyenne annuelle. Il y a moins de 100 m d'altitude moyenne entre groupes voisins.

En observant la variabilité de la réactivité des arbres à de faibles différences actuelles de températures, on peut conclure que le réchauffement du climat est susceptible de modifier très rapidement le comportement des arbres : les températures moyennes mensuelles sur la zone d'étude ont augmenté d'environ 1 °C au cours du XX^e siècle,

▼ Figure 2 – Accroissements annuels en diamètre : variations de la réponse du pin sylvestre au climat à moyenne altitude en fonction du bilan hydrique du site. A = favorable, B = moyen, C = défavorable (en ordonnée : coefficients de corrélation partielle des paramètres climatiques mensuels dans la régression PLS qui sert de base au modèle).





▲ Figure 3 – Réactivité de la croissance radiale du pin d'Alep aux paramètres climatiques mensuels (P : pluie, T : température moyenne, nombre : numéro du mois – Exemple : P6 = pluies de juin) en fonction de l'altitude, pour un bilan hydrique stationnel moyen (placettes B). La classe d'altitude représente la moyenne glissante de trois placettes successives (en ordonnée : coefficients de corrélation partielle des paramètres climatiques mensuels significatifs [pluie et température] dans la régression PLS qui sert de base au modèle).

et les scénarios actuels d'évolution du climat prévoient plusieurs degrés supplémentaires dans les 50 prochaines années.

Cernes caractéristiques

Bien que globalement synchrones, les cernes annuels de croissance des arbres ont parfois une forte variabilité intra et inter-individus au sein d'un peuplement et entre peuplements (Fritts, 1976). Cette variabilité vient des irrégularités de l'environnement physique et biologique de l'arbre, de la variabilité génétique des individus, de leurs différences d'âge, d'histoire et de morphologie, qui modulent leur sensibilité à certains événements.

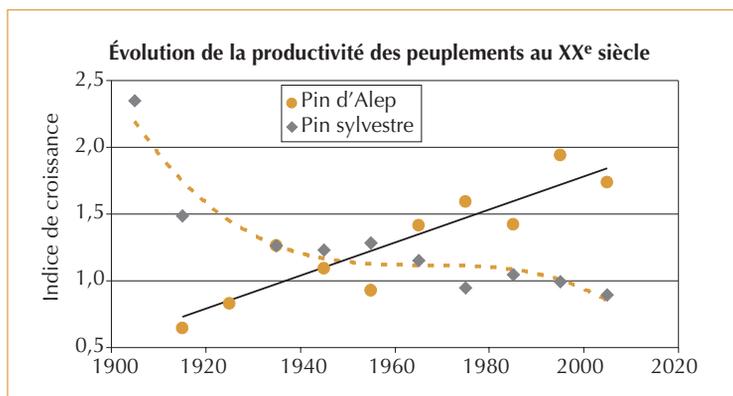
Par contre, les événements climatiques ou biologiques les plus marquants ont en général un effet très caractéristique sur un ou plusieurs cernes successifs à l'échelle de peuplements entiers et parfois de vastes régions (Schweingruber *et al.*, 1990) : croissance exceptionnellement faible ou forte du bois initial ou du bois final du cerne, absence de cerne sur 1 à 3 ans, densité du bois particulièrement forte ou faible, etc. La succession de cernes particuliers caractérise de façon fiable une époque donnée et permet de recalibrer les séries de cernes à l'année près.

La relation entre cernes caractéristiques et climat des années correspondantes est très instructive

sur les limites de la résistance des espèces aux extrêmes climatiques. Les effets pathologiques immédiats ou différés de ces accidents n'étant pas prédictibles par les modèles, ils sont intégrés *a posteriori* dans les séries simulées par les modèles. Dans le cadre du changement climatique, avec une multiplication probable d'événements extrêmes, cette analyse est importante. Sur notre dispositif, l'étude des cernes caractéristiques a montré que les principaux facteurs limitant la croissance et la survie étaient les gels intenses pour le pin d'Alep (figures 4 et 5, page 54), et les sécheresses et températures très élevées pour le pin sylvestre. Les chutes de neige lourde causent localement des dégâts importants et fréquents aux houppiers des pins sylvestres (figure 4) et elles limitent aussi l'extension en altitude du pin d'Alep. Des effets pathologiques apparaissent sur le pin sylvestre à partir des années 60 lors des sécheresses de plus en plus marquées. La canicule de l'année 2003 a eu des effets marqués sur les deux espèces.

Productivité des deux espèces

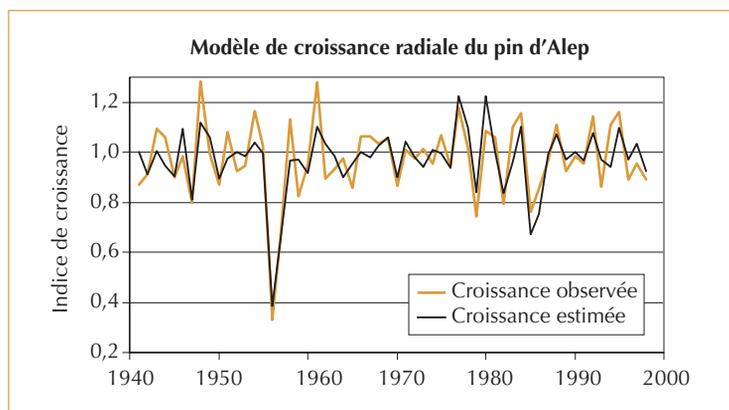
La croissance du pin d'Alep s'est accélérée au cours du XX^e siècle, indépendamment de l'altitude et du bilan hydrique stationnel, tandis que celle du pin sylvestre a diminué fortement entre 700 et 1 500 m d'altitude (Vila *et al.* 2005 ; figure 4).



▲ Figure 4 – Évolution de l'indice de productivité de *P. halepensis* et *P. silvestris* pendant le XX^e siècle. Les irrégularités de la tendance du pin d'Alep sont dues aux grands gels de 1956, 1985-87. Celles du pin sylvestre sont dues à des casses de neige (1973, 2001). Une baisse sensible est observable depuis 1999 pour les deux espèces : série d'années sèches, de casses de neige et canicule de 2003.

Étonnamment, la productivité des pins sylvestres aux plus basses altitudes (< 700 m), très faible à l'origine, est restée stable ou a augmenté au cours du XX^e siècle ; cette réponse spécifique a probablement, au moins pour partie, une origine génétique. Ces arbres ont été naturellement sélectionnés génétiquement depuis plusieurs générations dans un contexte de sécheresse et de températures élevées. Ils se sont également dès leur naissance adaptés morphologiquement à ces conditions extrêmes pour l'espèce : ratio biomasse racinaire/biomasse aérienne élevé, faible hauteur... Ils auraient donc mieux supporté le réchauffement climatique que les arbres de plus haute altitude, nés et vivant depuis de nombreuses générations dans un climat plus frais et moins sec. Par contre, ces arbres ont particulièrement souffert des températures extrêmes de l'année 2003 (cf. plus loin « Impact de la canicule 2003 »), ce

► Figure 5 – Comparaison des croissances observées et simulées du pin d'Alep pour les basses altitudes. On note l'incidence particulière du terrible gel de 1956, et dans une moindre mesure des gels de 1985-1987 et des sécheresses de 1947, 1979 et 1982.



qui démontre qu'à cette occasion, un seuil critique de température a été dépassé pour l'espèce malgré sa relative adaptation locale.

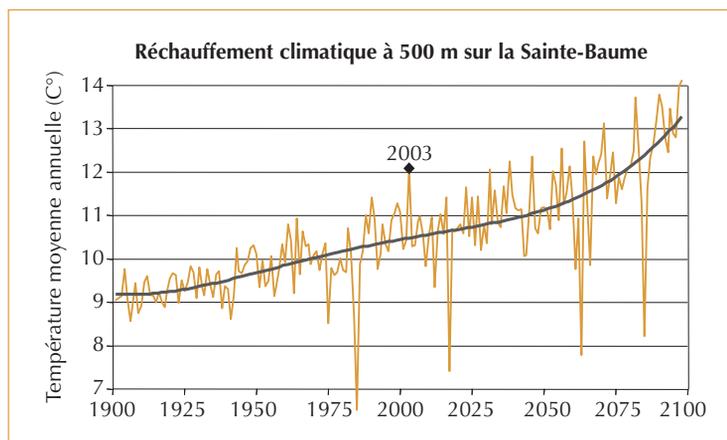
Modèles de relation climat-croissance

Des modèles liant variables climatiques et cernes de croissance ont été établis pour chacune des placettes sur la période 1900-1998 pour laquelle nous avons des données météorologiques fiables. Le nombre d'accidents climatiques violents étant important dans la zone d'étude, une méthode d'indexation spécifique en plusieurs étapes a été développée pour éliminer les effets non modélisables de ces accidents. La combinaison de ces modèles permet d'interpréter et de prédire les variations de la croissance radiale des arbres en fonction de l'ensemble des composantes de l'environnement : variations climatiques mensuelles et annuelles, bilan hydrique local, gradient d'altitude, accidents ponctuels. L'extrapolation de ces modèles permet de prédire aussi les tendances de croissance et de productivité en fonction des scénarios futurs de changement climatique.

Les figures 2 et 3 (page 53) donnent des exemples de modèles de relations climat-croissance pour chacune des espèces. La figure 5 donne un exemple de correspondance entre la prédiction et l'observation de la largeur indicée des cernes d'un peuplement à l'aide de ces modèles pour la période de calibration.

Le calcul de ces indices norme les valeurs brutes des cernes (centrage sur 1 et réduction des écarts-types), et élimine les tendances à long terme pour ne conserver que les écarts liés aux variations climatiques de courte période. On ne retrouve donc pas dans cette figure la tendance d'accroissement à long terme de productivité liée au changement

► Figure 6 – Évolution de la température moyenne annuelle sur la Sainte-Baume : scénario Météo-France 2001 (+ 2,5 °C au XXI^e siècle). Valeurs observées jusqu'en 2003, simulées de 2004 à 2099.

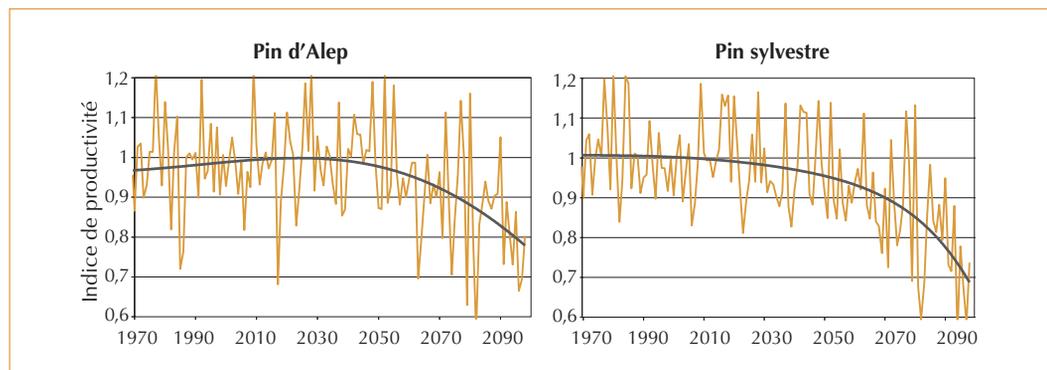


climatique (figure 4). Cette tendance doit être ajoutée *a posteriori*.

Ces modèles permettent de simuler la croissance des arbres en fonction de différents scénarios de changement climatique. Nous les avons testés sur la base d'un scénario fourni par Météo-France en 2000 (données régionalisées du modèle Arpège⁶), prédisant une augmentation de 2,5 °C en France de la température moyenne au XXI^e siècle (figure 6) sur la base d'un doublement du taux de CO₂ atmosphérique.

Deux exemples des prédictions d'évolution de la productivité sont présentés dans la figure 7. Le climat réel des années 1999 à 2004, qui n'était pas disponible lors de l'étude, a été simulé par le modèle. Dans la réalité, ce climat a été très défavorable et a conduit à une réduction de la productivité, même chez le pin d'Alep (*cf.* plus loin « Impact de la canicule 2003 »).

▼ Figure 7 – Évolution simulée de la productivité du pin d'Alep et du pin sylvestre entre 1970 et 2100. La base 1 est une référence relative par espèce. En valeur absolue, la productivité du pin sylvestre est 2 à 3 fois plus faible que celle du pin d'Alep.



Pour le pin sylvestre, on constate une diminution constante de la productivité avec un effondrement vers le milieu du XXI^e siècle. Les courbes sont similaires quelle que soit l'altitude. Pour le pin d'Alep, on remarque une poursuite de la tendance à l'accroissement dans les premières décennies du XXI^e siècle, qui s'inverse ensuite pour aboutir à une forte réduction dans la deuxième moitié du siècle. La courbe a la même allure à tous les niveaux d'altitude, mais une baisse un peu plus marquée aux altitudes les plus faibles.

Les derniers scénarios de changement climatique prévoient un réchauffement du climat beaucoup plus rapide que ceux qui étaient disponibles lors de cette étude. Il suffit de modifier l'échelle de ces figures entre 2000 et 2100 (2100 peut être remplacé par 2050) pour adapter ces figures aux derniers scénarios. L'effondrement de la productivité se produit alors très rapidement (quelques dizaines d'années) pour les deux espèces.

6. Logiciel de simulation numérique de l'atmosphère, mis en service par Météo-France dans sa version la plus évoluée en 1993, et développé en collaboration avec le Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme. Il a été conçu dès l'origine comme multi-usage, permettant aussi bien d'effectuer des prévisions à courte échéance ou à moyenne échéance, que de contribuer à l'étude des fluctuations et de l'évolution du climat. http://www.meteofrance.com/FR/pedagogie/dossiers_prevision_numerique2.jsp.

7. Office national des forêts.

Impact de la canicule de l'année 2003

À l'occasion de la canicule de l'année 2003, il nous a paru opportun d'étudier le comportement des peuplements bien connus de la Sainte-Baume suivant le gradient d'altitude et les niveaux de bilan hydrique. Il était aussi important de vérifier la fiabilité des modèles en comparant leurs estimations de croissance avec les données mesurées sur les cernes postérieurs à 1998, notamment ceux de 2003. Il était enfin important de profiter de l'effet 2003 pour introduire dans les modèles un événement jusqu'alors inédit mais dont la reproduction future est probable : la canicule de l'année 2003 est en effet une très bonne anticipation de ce que pourrait être le climat moyen au milieu du XXI^e siècle (figure 6, page 55).

L'étude en cours, qui fait l'objet d'une thèse, s'appuie sur la mise en place d'un réseau de placettes de référence dans la région PACA (avec l'ONF²), incluant celles de la Sainte-Baume. Elle comprend l'observation des peuplements et le prélèvement de carottes de 2003 à 2006 au moins, pour suivre leur évolution sanitaire et leur croissance, ainsi que l'analyse d'images satellites.

Les premiers résultats de cette étude montrent :

- que l'année 2003 n'est pas catastrophique pour la croissance en diamètre, conformément aux prédictions des modèles : la formation du cerne commençant tôt à la fin de l'hiver dans les régions méditerranéennes, la croissance était bien avancée en mai 2003 quand les stress thermique puis hydrique ont frappé les arbres. C'est principalement sur le bois final, dont la formation débute à la fin de printemps, que l'effet est marqué : ce bois final est très étroit, peu dense et souvent même totalement absent ;
- mais que les arbres, et la végétation dans son ensemble, ont beaucoup souffert pendant l'été 2003. Cela se traduit par la perte d'une forte proportion d'aiguilles pour conifères (figure 8), la perte précoce de feuilles et le dessèchement de pousses pour les feuillus. Ces symptômes sont les signes d'autres problèmes sérieux, bien qu'invisibles, au niveau de racines (mortalité) et des cellules vasculaires (cavitation), qui ont empêché les arbres de stocker des réserves. Ainsi, les arbres sont sortis affaiblis de l'année 2003 et un fort impact négatif sur la croissance s'est produit en 2004. Le printemps 2004 correspond à un pic de mortalité chez les arbres, plus marqué chez le pin sylvestre. En 2005, des dépérissements massifs ont été observés sur le pin sylvestre en dessous de



▲ Figure 8 – Houppiers « transparents » de jeunes pins d'Alep fin 2004 et détail d'une cime. Il ne reste qu'une à deux années d'aiguilles (2004 et parfois 2003) au lieu des quatre à cinq années habituelles. La capacité de photosynthèse et donc de croissance est réduite sur plusieurs années.

1 500 m d'altitude : soit par versants entiers sur les sols superficiels ou marneux dans l'ensemble des Alpes du Sud, soit de façon disséminée mais en forte proportion (jusqu'à 30 % des individus adultes et 70 % de la régénération) sur le massif de la Sainte-Baume et sur tous types de substrats.

L'analyse des cernes 2004 sur quelques placettes représentatives montre en première approximation que le cerne 2004 ne présente pas un développement meilleur que le cerne 2003, et qu'il est parfois absent. Les premiers prélèvements de cernes 2005 en fin de printemps montrent également un cerne anormalement étroit. Ceci souligne l'existence d'effets différés de la canicule 2003, tout à fait cohérents avec l'état sanitaire des arbres. En effet, fin 2005, la plupart des pins méditerranéens présentent encore un fort déficit d'aiguilles.

Discussion

Limite pin d'Alep/pin sylvestre

Le changement de climat met clairement le pin sylvestre en difficulté depuis quelques dizaines

d'années dans la partie méditerranéenne de son aire, et lui enlève toute compétitivité par rapport au pin d'Alep dans les zones où les deux espèces se côtoient.

La limite théorique entre les deux espèces devrait varier rapidement en altitude et en latitude avec l'élévation de la température et les sécheresses répétées. Cette hypothèse se trouve confirmée par les observations de terrain : des pins d'Alep âgés d'environ 20 ans se rencontrent maintenant à près de 1 000 m d'altitude sur la Sainte-Baume, soit 200 m plus haut que les peuplements âgés et que la limite de l'espèce donnée par la littérature. Au ralentissement de la croissance du pin sylvestre, s'ajoute le dépérissement de cette espèce amorcé en 2003 et qui s'accroît depuis dans la partie basse et méridionale de son aire.

Mais la limite physique entre les peuplements ne devrait pas évoluer au même rythme : étant donnée sa courte distance de dissémination (quelques centaines de mètres au maximum autour des adultes), il est impossible que le pin d'Alep remplisse naturellement, au cours du siècle à venir, l'ensemble des vides que laisseraient les peuplements de pin sylvestre dépérissant dans l'arrière pays méditerranéen.

Bouleversement des écosystèmes

On peut considérer ces deux pins comme des modèles, représentant respectivement les bioclimats supra et méso-méditerranéens, dont toutes les espèces sont soumises au bouleversement de leurs conditions de survie et de croissance. Certaines relations peuvent être établies entre la croissance des arbres et la production de biomasse herbacée (Liang *et al.*, 2003). En 2003, de nombreuses espèces arbustives et semi-ligneuses ont connu des taux de mortalité importants. L'éclaircissement des arbres et leur mortalité ouvrent la porte à un nouvel équilibre entre les strates basses et hautes de la végétation, et à une modification du microclimat forestier.

Des changements majeurs et rapides devraient donc intervenir dans les écosystèmes forestiers, d'autant plus que les nouveaux scénarios de changement climatique prévoient un réchauffement beaucoup plus important que celui dont nous disposons au cours de cette étude. Mais à cause des interactions complexes entre climat et sol, à cause de la lenteur de dissémination et de croissance des espèces arborées, parce qu'on ne maîtrise pas les effets de la compétition entre

espèces dans ces formations naturelles, et qu'on ne connaît pas la capacité d'adaptation génétique naturelle des arbres (2 à 3 générations maximum par siècle), ces changements restent encore imprévisibles.

En terme économique, l'impact des réductions de croissance et des dépérissements prévisibles dans les décennies à venir, notamment chez le pin sylvestre, est potentiellement important, car cette espèce est dominante en surface, volume et production (actuellement) dans l'arrière pays méditerranéen français.

Conclusion et perspectives scientifiques

Sur le plan forestier, la poursuite du travail est nécessaire, et particulièrement l'analyse des conséquences de l'année 2003, qui permettra d'améliorer les modèles de productivité. Une thèse démarre en 2005 co-encadrée par le Cemagref et l'IMEP. Les résultats de travaux de stagiaires au cours d'une pré-étude montrent que l'année 2003 aura des conséquences défavorables sur la croissance et l'état sanitaire des peuplements durant plusieurs années, et que les estimations de la productivité future doivent sans doute être revues à la baisse. De même, la forte mortalité des arbres en forêt observée depuis l'année 2003 doit faire l'objet d'une analyse particulière, et être comparée avec ce qui se produit dans d'autres régions du monde (notamment aux États-Unis où des millions d'hectares sont touchés après un épisode climatique de même ampleur en 2002). Cette mortalité ne peut être prédite par les modèles de croissance ; mais on voit mal comment le pin sylvestre, déjà en difficulté actuellement, survivrait au climat annoncé en région méditerranéenne à la fin du XXI^e siècle et même sans doute bien avant.

Afin de compléter notre dispositif, une étude similaire est en cours en Tunisie sur le pin d'Alep. Elle va du nord du pays en région côtière, avec un climat proche de la zone côtière française, jusqu'aux derniers peuplements en limite du désert au sud. Elle comprend des transects à l'échelle du pays et des transects locaux sur le modèle de la Sainte-Baume. Avec l'étude française, elle permet de couvrir la totalité de l'aire potentielle du pin d'Alep. Des dépérissements et réductions de productivité du pin d'Alep sont observés au sud de la Tunisie, en lien avec des séries récentes d'années chaudes et très sèches, phénomène

similaire à celui observé sur le pin sylvestre dans les conditions de limite d'aire.

Sur le plan écologique, des travaux complémentaires sont nécessaires sur le comportement des espèces arbustives et herbacées (inventaire floristique et analyse de la structure de végétation sur des réseaux de placettes anciennes).

D'un point de vue méthodologique, notre approche par transects locaux, donnant des indications fines sur le comportement des espèces aux limites, pourrait être étendue à de nombreuses espèces et régions en complément des gros dispositifs d'observation nationaux ou européens. Un travail similaire débute en Chine. □

Remerciements

Les auteurs remercient pour leur aide les nombreux propriétaires forestiers privés et publics de la Sainte-Baume qui ont autorisé les prélèvements et mesures dans leurs forêts, et particulièrement ceux du domaine de Font-Frège qui ont été sollicités de nombreuses fois. Ils remercient aussi Roland Estève pour son importante contribution aux travaux de terrain et aux mesures de laboratoire.

Résumé

Cet article présente l'approche méthodologique utilisée pour l'étude de l'impact du changement climatique sur la productivité de la forêt méditerranéenne et le déplacement de la limite bioclimatique entre pin d'Alep et pin sylvestre. Il donne aussi quelques uns des principaux résultats synthétiques de ces travaux. Les travaux sont surtout basés sur la dendroécologie, étude des relations entre l'environnement et les cernes de croissance des arbres. Le dispositif expérimental comporte une série de placettes alignées le long d'un transect altitudinal sur le versant nord du massif de la Sainte-Baume. Le choix du site, homogène pour le régime pluviométrique, ainsi que la grande homogénéité des substrats, des sols et de la topographie au niveau des placettes permettent de mettre en évidence les variations de réactivité des arbres au climat sur le seul critère de différences de températures. L'adjonction de placettes complémentaires avec des sols beaucoup plus ou beaucoup moins profonds à celles du transect principal permet aussi d'étudier l'interaction entre climat et réserve hydrique du sol sur la croissance des arbres. L'impact de la canicule et de la sécheresse exceptionnelle de l'année 2003 est aussi analysé. Le dispositif montre que la réactivité des arbres aux paramètres climatiques mensuels dépend beaucoup de la température moyenne annuelle et de la réserve hydrique des sols. Le réchauffement climatique devrait donc produire des effets significatifs sur la productivité forestière à court terme. Alors que la productivité du pin d'Alep a augmenté fortement au cours du XX^e siècle, celle du pin sylvestre a diminué tout aussi fortement. L'année 2003 a réduit directement la croissance de ces pins mais, surtout par ses effets différés sur leur état sanitaire et leur surface foliaire, limite leur capacité de croissance pour de nombreuses années. La productivité de ces deux pins devrait se réduire fortement dans les décennies à venir. Les dépérissements observés dans les peuplements de pin sylvestre depuis 2003 montre que l'avenir de vastes surfaces de cette espèce est menacé à court ou moyen terme par le réchauffement climatique dans la région PACA.

Abstract

This paper presents the methodological approach used for the study of the impact of climate change on the productivity of Mediterranean forests and the shift of the bioclimatic limit between *Pinus halepensis* and *Pinus silvestris*. It also gives some of the main synthetic results of this research, based mainly on dendroecology. The experimental design includes a series of plots distributed along an elevation transect on the north slope of Sainte-Baume mountain. The choice of the site, homogeneous for rainfall regime, as well as the homogeneity in substrata, soil and topography at the level of plots, allows to focus on the variations of the response of trees due to differences in mean annual temperatures. Additional plots with soils much deeper or much more shallow than those of the main transect also allow studying the interaction between climate and soil water balance on the growth of trees. The impact of the exceptional scorching heat and drought of year 2003 is also analyzed. The response of trees to monthly climatic parameters depends a lot on the annual mean temperature and soil water balance. The climate warming should thus produce significant effects on the short-term on forest productivity. While the productivity of the *Pinus halepensis* strongly increased during the 20th century, that of *Pinus silvestris* decreased strongly in the same period. Year 2003 reduced directly the growth of these pines. But, especially by its delayed effects on their health status and their leaf area, it limits their capacity of growth for several following years. The productivity of these two pines should be reduced strongly in the next decades. Many withering stands observed in *Pinus silvestris* distribution area since 2003 show that the survival of large areas of this species is threatened in the short or middle term by climate warming in the PACA region.

Bibliographie

- BADEAU, V., 1995, *Étude dendroécologique du hêtre (Fagus silvatica L.) sur les plateaux calcaires de Lorraine. Influence de la gestion sylvicole*, thèse de doctorat, université Henri-Poincaré, Nancy I, 205 p.
- BECKER, M., BERT, G.-D., BOUCHON, J., PICARD, J.-F., ULRICH E., 1994a, 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-4, p. 335-341.
- BECKER, M., NIEMINEN, T.-M., GÉRÉMIA, F., 1994b, Short term variations and long term changes in oak productivity in northeastern France. The role of climate and atmospheric CO₂, *Annales des Sciences Forestières*, n° 51, p. 477-492.
- BELINGARD, C., 1996, *Étude dendroécologique de la limite supérieure de la forêt dans les Alpes du sud en relation avec les facteurs climatiques et anthropiques*, thèse de doctorat, université Aix-Marseille III, 103 p.
- BERGER, A., 1992, *Le climat de la terre. Un passé pour quel avenir ?*, De Boeck Université, Bruxelles, 479 p.
- BERT, D., 1992, Silver fir (*Abies alba* Mill.) shows an increasing long-term trend in the Jura mountains, in *Tree rings and environment*, BARTHOLIN, T.-S., BERGLUND, B.-E., ECKSTEIN, D., SCHWEINGRUBER, F.-H., Ystad, p. 27-29.
- DAGET, P., 1977, Le bioclimat méditerranéen : caractères généraux, modes de caractérisation, *Vegetatio*, n° 34, p. 1-20.
- DIAZ, H.-F., BENISTON, M., BRADLEY, R.-S., 1997, *Climatic change at high elevation sites*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 530 p.
- FRITTS, H.-C., 1976, *Tree ring and climate*, Academic Press, New York, 567 p.
- GLADZEL, G., 1999, Historic forest use and its possible implication to recently accelerated tree growth in Central Europe, in *Proceedings of the International Seminar : Causes and consequences of accelerating tree growth in Europe*, Nancy, 14-16 mai 1998, KARJALAINEN, T., SPIEKER, H., LARO USSINIE, O., 1999, p. 65-74.
- GUIOT, J., 1982, Response functions, in *Climate from Tree-rings*, HUGHES, M.-K., KELLY, P.-M., PILCHER, J.-R., LAMARCHE, V.-C., Cambridge University Press, Cambridge, p. 38-45.
- HOFF, C., RAMBAL, F., 2000, Les écosystèmes forestiers méditerranéens face aux changements climatiques, in *Impacts potentiels des changements climatiques sur le fonctionnement d'un écosystème, en France au XXI^e siècle*, Mission interministérielle de l'effet de serre et ministère de l'Aménagement du territoire et de l'Environnement, Paris, p. 88-98.
- LIANG, E., VENNETIER, M., LIN, J., SHAO, X., 2003, Relationships between tree increment, climate and above-ground biomass of grass : a case study in the typical steppe, north China, *Acta Oecologica*, 24 (2), p. 87-94.
- KEELING, C.-D., WORF, T.-P., 2001, Atmospheric CO₂ records from site in the SIO air sampling network, in *Trends : A compendium of data on global change*, Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oack Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oack Ridge, USA.
- KELLER, T., EDOUARD, J.-L., GUIBAL, F., GUIOT, J., TESSIER, L., 1997 a., Atmospheric CO₂ doubling impact on tree-growth in French Alps and French Mediterranean area, in *Atti del XXXIV Corso di Cultura in Ecologia, San Vito di Cadore, Sep. 1997*, Università di Padova, URBINATI, C., CARRER, M., p. 55-64.
- KELLER, T., TESSIER, L., 1997 b, Climatic effect of atmospheric CO₂ doubling on radial tree-growth in southeastern France, *J. Biogeogr.*, n° 24, p. 857-864.
- KIRSBAUM, M.-U.-F., FISCHLIN, A., 1996, Climate change impacts on forest, in *Climate Change 1995. Impacts, adaptations and mitigation of climate change : Scientific-technical analyses*, WATSON R.-T., ZINYOWERA M.-C., MOSS, R.-H., DOKKEN, D.-J., Cambridge University Press, Cambridge, p. 95-130.
- LEBOURGEOIS, D., BECKER, M., 1996, Dendroécologie du pin laricio de Corse dans l'Ouest de la France. Évolution du potentiel de croissance au cours des dernières décennies, *Annales des Sciences Forestières*, n° 53, p. 931-946.
- NELLEMANN, C., THOMSEN, M.-G., 2001, Long-term changes in forest growth : Potential effects of nitrogen deposition and acidification, *Water Air and Soil Pollution*, 128 (3-4), p. 197-205.

NOUALS, D., BOISSEAU, B., 1992, *Le pin laricio dans les Cévennes. Croisement raisonné de plusieurs outils d'évaluation du milieu*, Cemagref Aix-en-Provence, 47 p.

PAULY, H., BELROSE, V., 2005, *La santé des forêts françaises : actualités de l'année 2004 – Sécheresse et canicule de l'été 2003 : observation en 2004 des conséquences sur les peuplements forestiers adultes*, rapport, ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation, de la Pêche et de la Ruralité, Département santé des forêts, 11 p.

PICARDN, J.-F., 1995, Évolution de la croissance radiale du hêtre dans les Vosges. Premiers résultats sur le versant lorrain, *Annales des Sciences forestières*, n° 52, p. 11-21.

PRENTICE, I.-C., 2001, The carbon cycle and atmospheric carbon dioxide, in *In Climate Change 2001 : The scientific basis*, HOUGHTON, J.-T., DING, Y., GRIGGS, D.-J., NOGUER, M., VAN DER LINDEN, P.-J., DAI, X., MASKELL, K., JOHNSON, C.-A., Cambridge University Press, p. 183-237.

RAMASWAMY, V., 2001, Radiative forcing of climate change, in *In Climate Change 2001 : The scientific basis*, HOUGHTON, J.-T., DING, Y., GRIGGS, D.-J., NOGUER, M., VAN DER LINDEN, P.-J., DAI, X., MASKELL, K., JOHNSON, C.-A., Cambridge University Press, p. 349-416.

RATHGEBER, C., GUIOT, J., ROCHE, P., TESSIER, L., 1999, Augmentation de productivité du chêne pubescent en région méditerranéenne française, *Annals of Forest Science*, n° 56, p. 211-219.

RATHGEBER, C., GUIOT, J., EDOUARD, J.-L., 2000 a, Using a biochemical model in Dendroecology. Application to *Pinus cembra*, *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, série III, 323, 5, p. 489-497.

RATHGEBER, C., NICAULT, A., GUIOT, J., KELLER, T., GUIBAL, F., ROCHE, P., 2000 b, Simulated responses of *Pinus halepensis* forest productivity to climatic change and CO₂ increase using a statistical model, *Global Planetary Change*, n° 26, p. 405-421.

RATHGEBER, C., NICAULT, A., GUIOT, J., KAPLAN, J.-O., ROCHE, P., 2004, Simulated responses of *Pinus halepensis* forest production to climate change and CO₂ increase using a biogeochemistry model, *Ecological Modelling*.

RIPERT, C., BOISSEAU, B., 1993, *Écologie et croissance du cèdre de l'Atlas en Provence*, Cemagref Aix-en-Provence, 104 p.

SCHWEINGRUBER, F.-H., ECKSTEIN, D., SERRE-BACHET, F., BRÄKER, O.-U., 1990, Identification, presentation and interpretation of event years and pointer years in dendrochronology, *Dendrochronologia*, n° 8, p. 9-38.

SPIECKER, H., MIELIKÄINEN, K., KÖHL, M., SKOVSGAARD, J., 1996, *Growth trends in European forests*, Springer-Verlag, Heidelberg, 372 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, in *International Seminar, Causes and consequences of accelerating tree growth in Europe*, Nancy, 14-16 mai 1998, EFI & ECOFOR (Org.), TIMO KARJALEINEN, T., SPIECKER, H., LAROUSSINIE, O., EFI Proceedings n° 27, p. 263-265.

VILA, B., NICAULT, A., VENNETIER, M., 2001, Influence de la densité des peuplements sur la croissance en hauteur et radiale de *Pinus sylvestris* L. en région méditerranéenne française, *Forêt Méditerranéenne*, tome XXII, n° 1, p. 65-74.

VILA, B., VENNETIER, M., 2003, *Impact du changement climatique sur le déplacement d'une limite bioclimatique en région méditerranéenne*, Cemagref Aix-en-Provence, IMEP, ECOFOR, 141 p.

VILA, B., VENNETIER, M., LIANG, E., RIPERT, C., CHANDIOUX, O., GUIBAL, F., 2005 (soumis), *Did global change already modify tree's productivity : Consequences on vegetation distribution in the French Mediterranean Ecosystem*.