



**HAL**  
open science

## Impact du changement climatique et de la canicule de 2003 sur la productivité et l'aire de répartition du pin sylvestre et du pin d'Alep en région méditerranéenne

Michel Vennetier, Bruno Vila, Er-Yuan Liang, Frédéric Guibal, Christian Ripert, Olivier Chandieux

### ► To cite this version:

Michel Vennetier, Bruno Vila, Er-Yuan Liang, Frédéric Guibal, Christian Ripert, et al.. Impact du changement climatique et de la canicule de 2003 sur la productivité et l'aire de répartition du pin sylvestre et du pin d'Alep en région méditerranéenne. Rendez-vous Techniques de l'ONF, 2006, hors-série 3, pp.67-73. hal-03976091

**HAL Id: hal-03976091**

**<https://hal.science/hal-03976091v1>**

Submitted on 15 Jul 2024

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

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

# Impact du changement climatique et de la canicule de 2003 sur la productivité et l'aire de répartition du pin sylvestre et du pin d'Alep en région méditerranéenne

Alors que les hêtres lorrains sont « dopés » par les changements globaux, ne perdons pas de vue les milieux méditerranéens, qui pourraient bien souffrir à très court terme de la dérive climatique. Ce zoom sur la Sainte-Baume met en évidence un déplacement de la limite entre pin sylvestre et pin d'Alep, et illustre l'intérêt de l'étude des espèces en limite d'aire pour la compréhension des impacts du changement climatique.

## Introduction : contexte de l'étude

Dans tout l'hémisphère Nord, une augmentation de l'accroissement annuel moyen des arbres a été notée au 20<sup>e</sup> siècle pour le diamètre ou la hauteur de la plupart des essences forestières (Becker et al., 1994 ; voir aussi Dhôte et al. dans ce même volume). La communauté scientifique s'accorde pour attribuer ces variations de croissance à une combinaison de changements majeurs dans l'environnement :

- le réchauffement climatique dû aux gaz à effet de serre, et notamment l'allongement de la saison de végétation,
- l'effet fertilisant de l'accroissement du taux de CO<sub>2</sub> dans l'air,
- le dépôt des pollutions azotées atmosphériques,
- la reconstitution de sols dégradés après abandon de pratiques de surexploitation.

Pour la zone méditerranéenne, les résultats sont plus rares que dans le reste de la France et de l'Europe, mais ils sont concordants. Ils montrent une accélération de la croissance en hauteur au cours des dernières dizaines d'années pour le cèdre de l'Atlas, le pin laricio et le pin d'Alep (Vennetier et al., 1999), ou de la

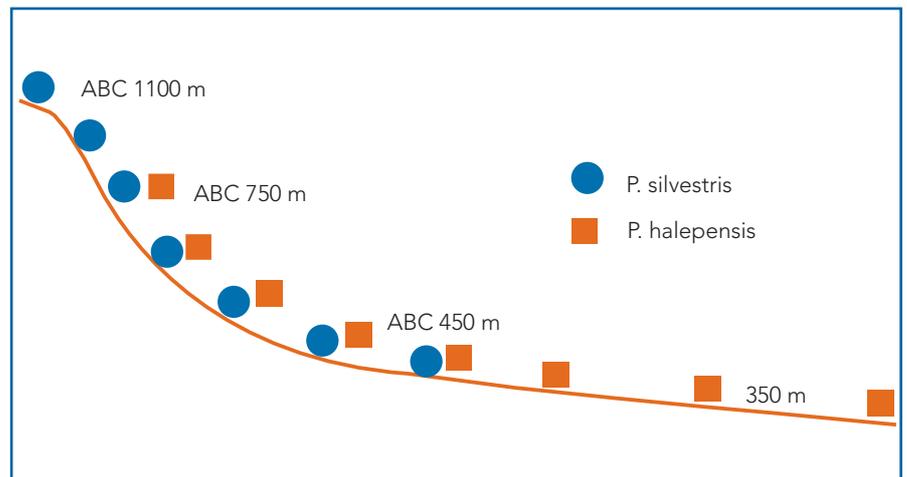


Fig. 1 : coupe transversale du dispositif sur le versant nord de la Sainte-Baume

Les placettes du transect principal sont homogènes pour la fertilité et le bilan hydrique ; à trois altitudes différentes, des placettes complémentaires sont choisies à 3 niveaux contrastés de bilan hydrique (notés ABC).

croissance en diamètre pour le chêne pubescent (Rathgeber et al., 1999).

Le climat méditerranéen est caractérisé par une forte sécheresse estivale, principale contrainte pour la végétation, et qui pourrait devenir critique avec la poursuite annoncée du réchauffement climatique. Les années très chaudes et les sécheresses qui se sont succédées depuis 1998, avec leur paroxysme en 2003, semblent en effet avoir mis à mal la végétation en région méditerranéenne.

## Le dispositif expérimental

Notre dispositif expérimental est destiné à étudier les variations à long terme de la productivité du pin d'Alep et du pin sylvestre. C'est un transect court (quelques km de long pour 800 m de dénivelé) le long du versant nord du massif de la Sainte Baume dans les Bouches du Rhône (figure 1). Les placettes principales (comportant 15 à 20 arbres dominants) ont été choisies pour l'homogénéité du substrat, du sol et de la topographie. Le régime temporel des

pluies est homogène sur la zone d'étude, avec de faibles variations quantitatives entre le pied et la crête. Les placettes se répartissent de part et d'autre de la limite bi-climatique entre le pin d'Alep et le pin sylvestre : le premier domine la plaine et le bas de versant, le second occupe la crête de la montagne et le haut de versant. Le milieu de versant, sur quelques centaines de mètres de dénivelé, constitue la seule partie commune aux aires de répartition par ailleurs totalement disjointes de ces deux espèces.

Pour l'étude des variations de productivité, nous utilisons les méthodes de la dendroécologie : l'étude des cernes de croissance des arbres et de leurs relations avec l'environnement. La réaction des arbres au climat a ainsi été analysée *a posteriori* sur les 70 à 100 derniers cernes de 300 arbres de ce dispositif en fonction de leurs conditions de croissance : climat, bilan hydrique local, altitude.

## Résultats principaux

### Les caractéristiques du sol conditionnent la réponse au climat

À altitude identique, la réactivité au climat et aux changements d'environnement pour une espèce donnée dépend beaucoup du bilan hydrique local :

- sur les sols superficiels, les pins (surtout sylvestre) sont plus sensibles aux conditions climatiques du début du printemps car ils n'y bénéficient pas des réserves de l'hiver. Se mettant en état de résistance à la sécheresse dès fin juin, ils sont indifférents aux précipitations de l'été et aux températures du milieu d'été, sauf canicule exceptionnelle ; ils ne peuvent que rarement profiter d'éventuelles pluies précoces de fin d'été et automne.

- Sur les bonnes stations, les réserves en eau du sol permettent aux arbres de ne pas trop dépendre des pluies du début de prin-

temps, de poursuivre leur croissance plus longtemps en début d'été et de reprendre leur croissance (polycyclisme) lorsque la fin d'été et l'automne sont favorables.

Pour le pin sylvestre, les températures élevées sont très défavorables à la croissance durant une grande partie de la saison de végétation, quelle que soit la station. Au contraire, le pin d'Alep est favorisé par des températures élevées de février à mai.

### Une réponse au climat modulée selon l'altitude

Nous avons observé une variation, régulière le long du versant, de la relation liant les paramètres climatiques (pluies et températures mensuelles) et la croissance des pins (figure 2). L'écart d'altitude entre les placettes extrêmes utilisées dans la figure 2 n'est que de 300 m, correspondant à 1,8 °C de température moyenne annuelle, et les différences sont significatives pour des variations d'altitude de moins de 100 m. Ces différences s'expliquent en partie par un

décalage du début ou de la fin de la saison de végétation, ainsi que par l'arrivée plus ou moins précoce des fortes chaleurs, qui décalent les phases de croissance des arbres et l'utilisation des réserves en eau du sol par rapport au régime des pluies, ce dernier étant constant sur l'ensemble du massif.

À basse altitude, la saison de végétation est plus longue, ce qui rend les arbres plus précocement et plus tardivement sensibles aux aléas climatiques. Les températures de février (et parfois de fin janvier) sont presque toujours assez favorables pour préparer les végétaux au débournement, avec un risque de gelée accru en cas de coup de froid en fin d'hiver. Les arbres subissent dès avril des températures élevées et épuisent vite les réserves en eau du sol : ils dépendent fortement des pluies dès le mois de mai pour poursuivre leur croissance amorcée en mars. Certaines années, des pluies abondantes en fin d'été couplées avec des températures élevées en automne, permettent le redémar-

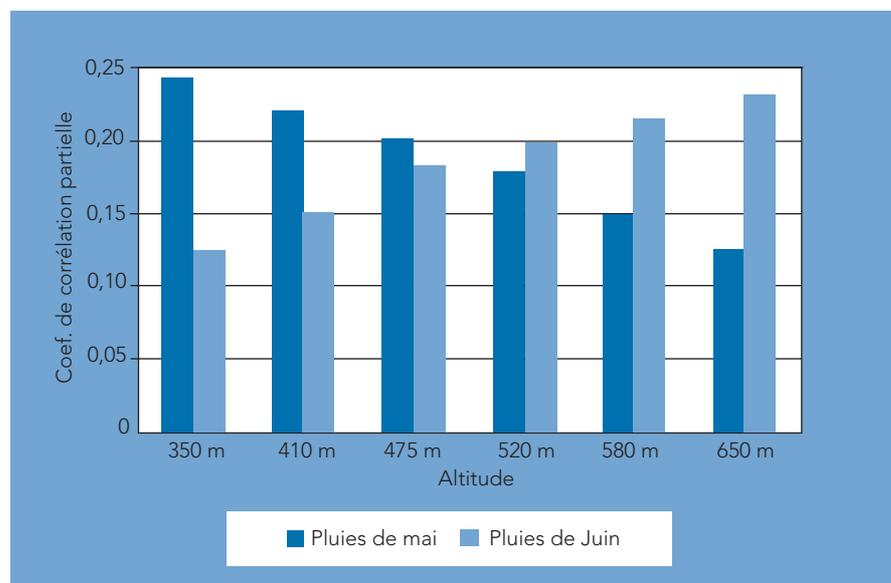


Fig 2 : réactivité du pin d'Alep aux paramètres climatiques mensuels en fonction de l'altitude : exemple des pluies de printemps

Le coefficient de corrélation mesure la sensibilité des arbres au paramètre considéré. Les variations de réactivité des arbres observées sur notre dispositif, pour des faibles différences de température moyenne annuelle, permettent de supposer que le réchauffement du climat a des conséquences rapides sur la croissance de ces arbres. Or les températures moyennes mensuelles sur la zone d'étude ont augmenté d'environ 1 °C au cours du 20<sup>e</sup> siècle, et les scénarios actuels d'évolution du climat prévoient plusieurs degrés supplémentaires dans les 50 à 100 prochaines années (cf. Déqué, ce même volume).

rage de la croissance en diamètre et en hauteur (polycyclisme).

À plus haute altitude, le débourrement printanier est plus tardif. Les réserves en eau du sol s'épuisent moins vite, rendant les arbres plus dépendants des pluies de juin que de celles de mai. Ces pluies de juin sont moins abondantes et font plus fréquemment défaut que celles de mai, ce qui rend alors la saison de végétation très courte, même si les conditions de températures entre avril et juin sont peu contraignantes pour la croissance. Les températures d'automne sont rarement assez élevées pour permettre le polycyclisme.

### Évolution de la productivité du pin d'Alep et du pin sylvestre sur la Sainte-Baume

La croissance du Pin d'Alep s'est accélérée au cours du 20<sup>e</sup> siècle, indépendamment de l'altitude et du bilan hydrique stationnel, tandis que celle du pin sylvestre a diminué fortement (figure 3). L'étude des cernes exceptionnellement minces a montré que les principaux facteurs limitant la croissance et la survie des peuplements étaient les gels intenses pour le pin d'Alep (figures 3 et 4), 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 et 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 dévastateurs sur les 2 espèces.

### Modèles de relation climat-croissance

Ces modèles ont été établis pour chacune des placettes. Leur combinaison permet d'interpréter et de prédire les variations de la

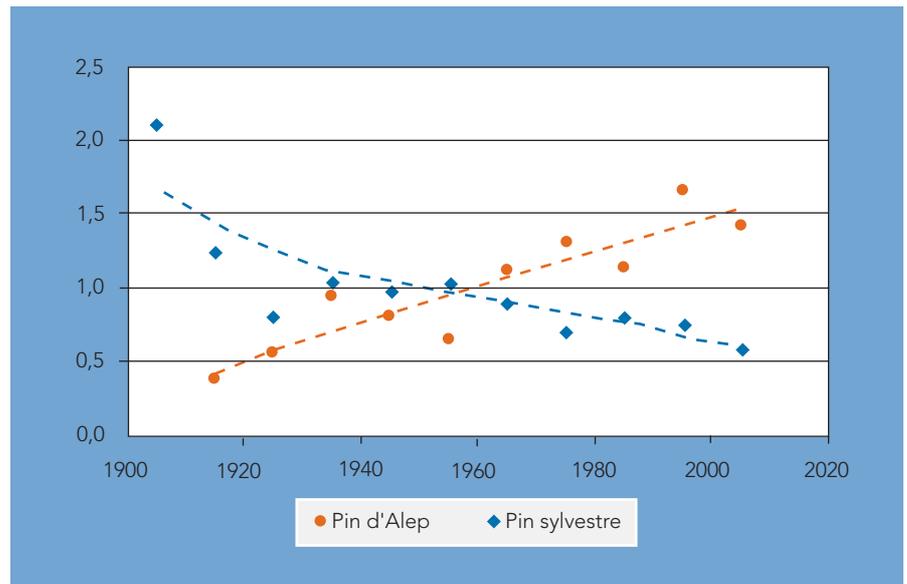


Fig. 3 : évolution de l'indice de productivité du pin d'Alep et du pin sylvestre pendant le 20<sup>e</sup> siècle

La valeur 1 est relative à la moyenne de chaque espèce sur le siècle. En valeur absolue, la productivité du pin sylvestre est 2 à 3 fois plus forte que celle du pin d'Alep à altitude égale. Les irrégularités de la tendance du pin d'Alep sont dues aux grands gels de 1956 et 1985-87, celles du pin sylvestre à des casses de neige (1922, 1973). Une baisse sensible est observable depuis 1998 pour les deux espèces : série d'années sèches, de casses de neige et canicule de 2003.

croissance radiale des arbres en fonction des composantes de l'environnement : climat, bilan hydrique local, altitude (Vennetier et al., 2005). Ces modèles permettent de simuler la croissance des arbres en fonction de différents scénarios de changement climatique. Nous les avons testés sur un

scénario fourni par Météo-France en 2000 (données régionalisées du modèle Arpège), prédisant une augmentation de 2,5 °C de la température moyenne en France au 21<sup>e</sup> siècle (figure. 4).

Deux exemples de ces prédictions d'évolution de la productivité sont



Casse de neige sur pin d'Alep

M. Vennetier, Cemagref

présentés dans la figure 5. Pour le pin sylvestre, on constate une diminution constante de la productivité avec un effondrement vers le milieu du 21<sup>e</sup> 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 21<sup>e</sup> 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 présente une baisse un peu plus marquée aux altitudes les plus faibles.

### Impact de la canicule de l'année 2003

À l'occasion de la canicule de l'année 2003, nous avons étudié le comportement des arbres du dispositif de la Sainte-Baume, auquel ont été adjointes des placettes de pin maritime et pin pignon. Cela permet d'introduire dans les modèles un événement jusqu'alors inédit mais dont la reproduction future est probable (Deneux, 2002) : la canicule de l'année 2003 est en effet une très bonne anticipation de ce que pourrait être le climat moyen au milieu du 21<sup>e</sup> siècle (figure 4). Ce travail a été étendu en 2006 à un réseau de placettes représentatives de la région PACA.

Les premiers résultats de cette étude montrent que :

- le cerne 2003 est mince mais pas catastrophique, et que c'est plus son profil de densité qui est original. Sa formation était bien avancée en mai quand a débuté la canicule et le bois initial est donc presque normal. L'effet est par contre très marqué sur le bois final, très mince, peu dense et parfois même absent.

- Les arbres sont sortis très affaiblis de l'été 2003, comme dans d'autres régions françaises (Pauly et Belrose, 2005) : perte d'une forte proportion d'aiguilles pour les conifères, perte précoce de

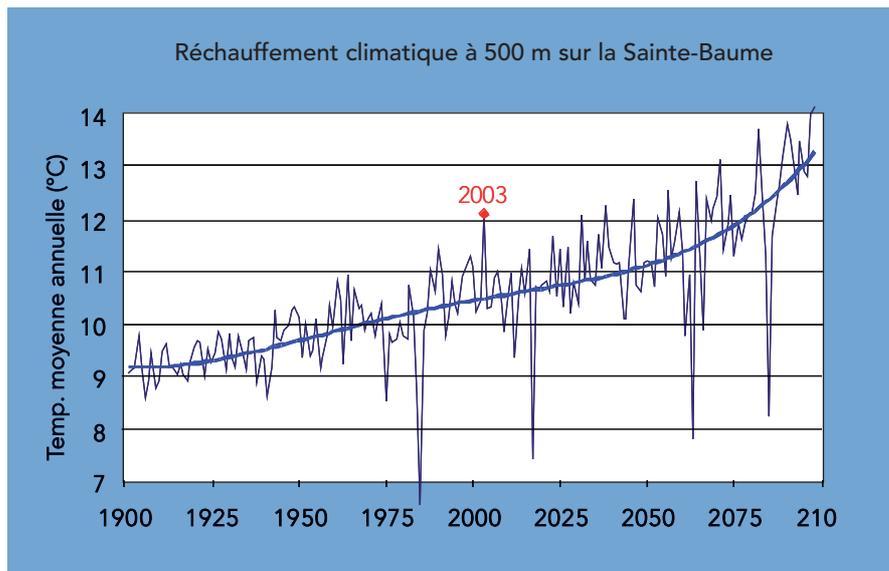


Fig. 4 : évolution de la température moyenne annuelle sur la Sainte-Baume ; scénario Météo-France (+2,5 °C au 21<sup>e</sup> siècle)

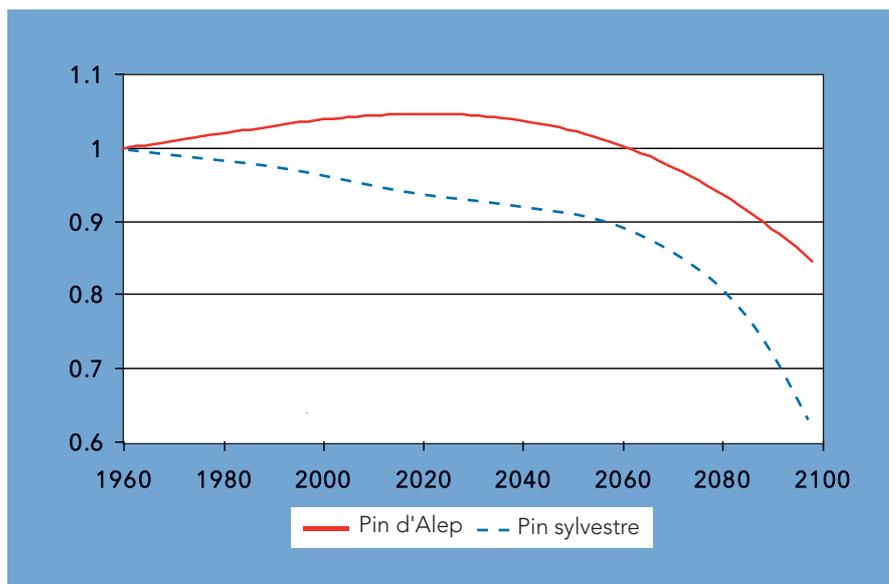


Fig. 5 : évolution simulée de la productivité du pin d'Alep et du pin sylvestre entre 1960 et 2100 ; exemple pour les placettes d'altitude moyenne pour chaque espèce

La base 1 est une référence relative par espèce en 1960. La simulation reproduit bien les tendances observées entre 1960 et 2000.

feuilles et le dessèchement de pousses pour les feuillus. Le plus fort impact négatif sur la croissance s'est produit en 2004, accompagné d'un pic de mortalité au printemps, plus marqué chez le pin sylvestre. De 2005 à 2007, des dépérissements massifs ont été observés sur le pin sylvestre en dessous de 1500 m d'altitude : par

versants entiers sur les sols superficiels ou marneux dans l'ensemble des Alpes du sud, 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. Sur le pin d'Alep, la mortalité est limitée aux arbres très affaiblis par des casses



M. Vennetier, Cemagref

Effet différé de canicule : houppier dépérissant de pin sylvestre

tant la forêt très sensible aux incendies. Fin 2005, la proportion de biomasse morte restait très supérieure à la normale, la croissance de ces végétaux ayant été faible durant les deux années suivant la canicule, à cause de printemps très secs.

### Discussion : évolution présumée des paysages forestiers méditerranéens

#### Limite pin d'Alep/pin sylvestre

Le pin sylvestre est en difficulté depuis quelques dizaines d'années dans la partie méditerranéenne de son aire. Il n'y est plus compétitif face au pin d'Alep dans les zones où les deux espèces se côtoient. La limite théorique entre les deux espèces varie rapidement en altitude et en latitude avec l'élévation de la température et la répétition des sécheresses. Nous avons vérifié ce déplacement à l'aide d'un modèle de bilan hydrique développé par le Cemagref d'Aix en Provence (Ripert et Vennetier, 2005). Ce modèle est couplé aux études autécologiques des principales essences forestières méditerranéennes, et permet de spatialiser à l'échelle régionale les limites de survie et les principales classes de productivité de ces essences. La figure 6 montre que l'aire potentielle du pin sylvestre disparaît du sud de la Provence avant la fin du 21<sup>e</sup> siècle, et que la zone de faible productivité du pin d'Alep gagne du terrain.

Ces résultats sont cohérents avec ceux de notre dispositif expérimental présentés ci-dessus. Les dépérissements de pin sylvestre amorcés en 2003 et qui s'accroissent depuis dans la partie basse et méridionale de son aire (Département santé des forêts, 2003 à 2007) semblent confirmer ce déplacement théorique de sa limite bioclimatique.

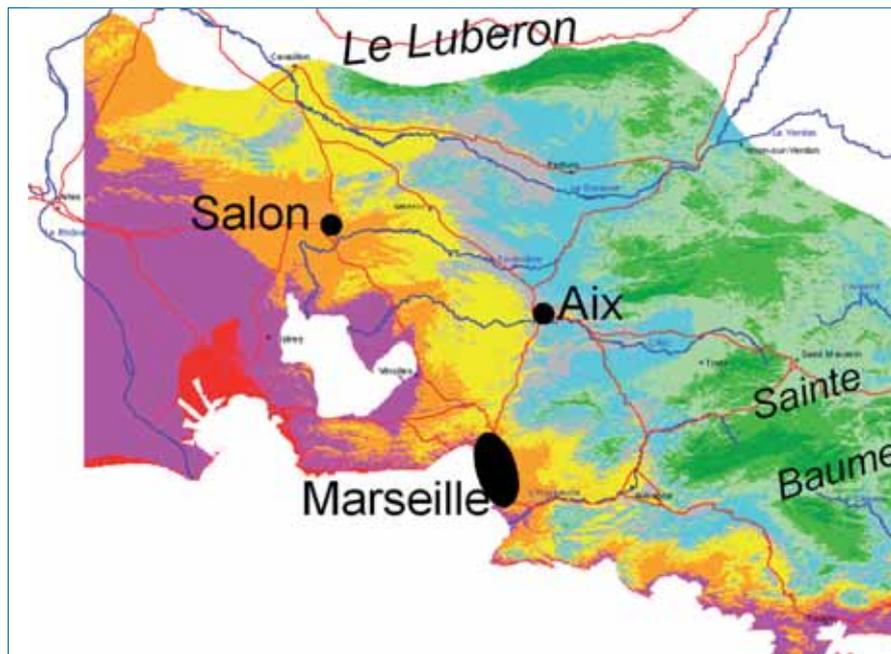
de neige en 2001, ou à des arbres isolés sur des dalles rocheuses. En 2007, la plupart des pins méditerranéens présentent encore un fort déficit d'aiguilles (entre 1 et 3 années). Les cernes de 2005 et 2006 sont très variables, et anormalement minces. Les pousses de ces années ainsi que la longueur de leurs aiguilles et leur diamètre sont très inférieurs à la normale. Cela souligne l'existence d'effets différés sur plusieurs années de la canicule 2003, amplifiés par une sécheresse persistante. L'état sanitaire des arbres est resté mauvais jusqu'en 2007 (houppier clair, nombreux rameaux morts, aiguilles jaunes).

Si l'on applique aux modèles ayant servi à construire la figure 5 une correction correspondant aux effets différés de 2003, chaque fois que des années semblables se produisent dans le scénario d'évolution climatique, les courbes du pin sylvestre et celle du pin d'Alep s'effondrent beaucoup plus rapidement. La productivité du pin d'Alep ne croît plus au début du 21<sup>e</sup> siècle. Ces tendances sem-

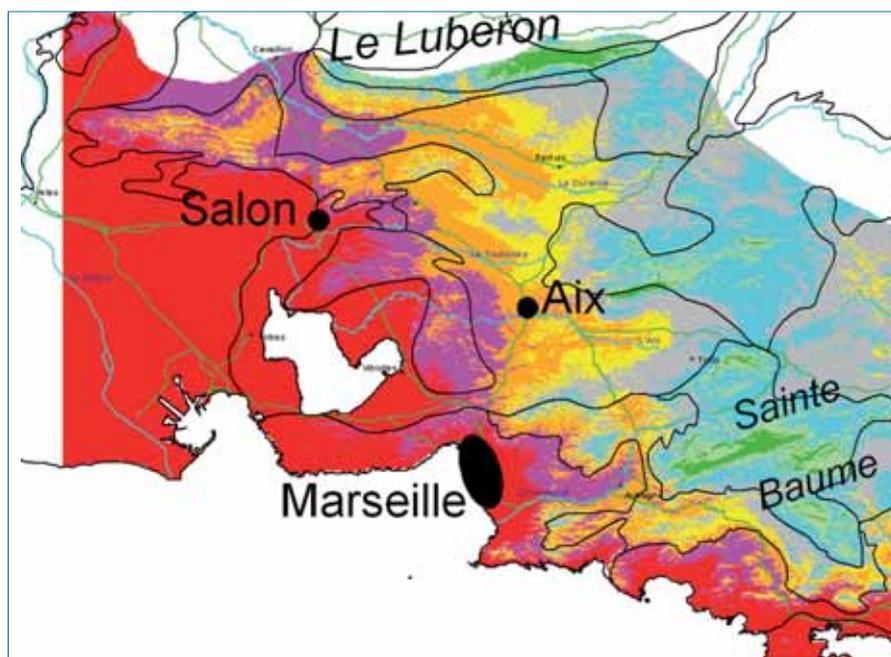
blent déjà amorcées dans la figure 3 (dernier point à droite pour chaque espèce). Il est cependant nécessaire d'attendre la fin des travaux en cours pour conclure sur ces tendances.

Il faut noter que le pin maritime et le pin pignon ont des comportements proches de ceux du pin d'Alep. Le pin maritime est victime de dépérissements moins marqués que ceux du pin sylvestre mais plus que ceux du pin d'Alep. Ces dépérissements touchent principalement des arbres précédemment affaiblis par des parasites comme la cochenille ou la pyrale du tronc.

Parallèlement aux dégâts sur les arbres, la canicule a aussi touché le sous-étage et les garrigues. Une forte mortalité (30 à 80 %) a été enregistrée sur les ligneux bas (particulièrement ajoncs, genets et cistes), accompagnée par le dessèchement partiel des individus survivants, y compris pour les espèces typiquement méditerranéennes comme le thym ou le romarin. La biomasse morte a ainsi été considérablement accrue, ren-



situation en l'an 2000



situation en l'an 2100

Fig. 6 : évolution de l'aire potentielle du pin sylvestre et du pin d'Alep  
Le vert le plus foncé en 2000 correspond à l'aire potentielle du pin sylvestre. Il a disparu de la carte 2100. Le reste correspond à l'aire du pin d'Alep. Pour des sols moyens, la productivité du pin d'Alep est faible dans les zones rouges à jaune, et forte ailleurs.

Mais la limite physique entre les peuplements ne devrait pas évoluer au même rythme : étant donné sa courte distance de dissémination (quelques centaines de mètres en général 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 le pin sylvestre et le pin d'Alep comme des espèces représentatives respectivement des bioclimats supra et méso-méditerranéens, dont toutes les espèces sont soumises au bouleversement de leurs conditions de survie et de croissance (Badeau *et al.*, 2005). 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 méditerranéens, d'autant plus que les nouveaux scénarios de changement climatique prédisent un réchauffement beaucoup plus important que celui du scénario utilisé au cours de cette étude. Mais ces changements restent encore imprévisibles : les interactions complexes entre climat et sol, la lenteur de dissémination et de croissance des espèces arborées, les effets de la compétition entre espèces dans ces formations naturelles, la capacité d'adaptation génétique naturelle des arbres, sont autant de facteurs déterminants et encore trop mal connus pour être intégrés dans une prévision globale.

En termes économiques, 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 encore dominante en surface, volume et production dans l'arrière-pays méditerranéen français.

## Conclusion et perspectives

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 et d'affiner les scénarios pour le futur. Les premiers résultats 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 par la prise en compte des effets différés de tels événements extrêmes. De même, la forte mortalité des arbres en forêt observée depuis l'année 2003 doit faire l'objet d'une analyse particulière. Elle ne peut pas 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 pour la fin du 21<sup>e</sup> siècle.

Sur le plan écologique, des travaux complémentaires sont nécessaires sur le comportement des espèces arbustives et herbacées (inventaires floristiques 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.

**Michel VENNETIER**  
Cemagref, Aix en Provence

**Bruno VILA**  
Institut Méditerranéen d'Écologie  
et de Paléoécologie  
Marseille

**Er-Yuan LIANG**  
Chinese Academy of Sciences  
Beijing, Chine

**Frédéric GUIBAL**  
Institut Méditerranéen d'Écologie  
et de Paléoécologie  
Marseille

**Christian RIPERT**  
**Olivier CHANDIOUX**  
Cemagref, Aix en Provence

## Remerciements

Les auteurs remercient les nombreux propriétaires forestiers, publics et privés, qui ont facilité cette étude en autorisant l'accès des chercheurs, l'installation de placettes et les récoltes d'échantillons sur leurs propriétés. Les travaux de recherche ont été financés par le GIP ECOFOR, la région Provence - Alpes - Côte d'Azur et le Cemagref.

## Bibliographie

BADEAU V., DUPOUEY J.L., CLUZEAU C., DRAPIER J., 2005. Aires potentielles de répartition des essences forestières d'ici 2100.. Forêt Entreprise, n°162, dossier "la forêt face aux changements climatiques", pp. 25-29

BECKER M., BERT G.D., BOUCHON J., PICARD J.F., 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 19<sup>e</sup> siècle. Revue Forestière Française, vol. 46, n° 4, pp. 335-341

DENEUX M., 2002. Rapport sur l'évaluation de l'ampleur des changements climatiques, de leurs causes et de leur impact prévisible sur la géographie de la France à l'horizon 2025, 2050 et 2100. Tome I : Rapport. Paris : Sénat, Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques. Rapport d'information n° 224, 281 p.

DSF 2003 à 2007. Plusieurs rapports sur l'état de santé des forêts après la canicule de 2003 peuvent être trouvés sur le site web du département santé des forêts du ministère de l'Agriculture. <en ligne : <http://agriculture.gouv.fr/sections/thematiques/foret-bois/sante-des-forets>>

PAULY H., BELROSE V., 2005. Bilan de la santé des forêts en 2004. Sécheresse et canicule de l'été 2003 : observation en 2004 des conséquences sur les peuplements forestiers adultes. Paris : Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation, de la Pêche et de la Ruralité, département santé des forêts. 11 p. <en ligne : [http://agriculture.gouv.fr/spip/IMG/pdf/reseaux\\_2004\\_suite\\_secheresse\\_canicule.pdf](http://agriculture.gouv.fr/spip/IMG/pdf/reseaux_2004_suite_secheresse_canicule.pdf)>

RATHGEBER C., GUIOT J., ROCHE P., TESSIER L., 1999. Augmentation de productivité du chêne pubescent en région méditerranéenne française. Annals of Forest Science, vol. 56, n° 3, pp. 211-219

RIPERT C., VENNETIER M., 2005. Évaluer la potentialité d'un site sans observer la flore. Rendez-vous techniques, n° 8, pp. 15-22

VENNETIER M., RIPERT C., BROCHIERO F., CHANDIOUX O., 1999. Évolution à court et long terme de la croissance du pin d'Alep en Provence : conséquence sur la production de bois. Forêt méditerranéenne, tome 20, n° 4, pp. 147-156

VENNETIER M., VILA B., LIANG E.Y., GUIBAL F., RIPERT C., CHANDIOUX O., ESTEVE R., 2005. Impact du changement climatique sur la productivité forestière et le déplacement d'une limite bioclimatique en région méditerranéenne française. Ingénieries, n° 44, pp. 49-61