

Suivi de la réponse de la végétation au changement climatique : approche par transects

Assessing climate change impact on vegetation with transects

Vennetier, Michel (1)* ; Vila, Bruno (2) ; Liang Er-Yuan (3) ; Guibal Frédéric (2)

(1)* Cemagref, UR Écosystèmes Méditerranéens et Risques, Aix-en-Provence; michel.vennetier@cemagref.fr (auteur correspondant)

(2) Institut Méditerranéen d'Écologie et de Paléoécologie, CNRS UMR 6116, Aix en Provence et Marseille ;

(3) Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences Beijing, Chine

Résumé

Le suivi des variations de la réponse des essences forestières aux changements climatiques peut se concevoir à l'échelle de leur aire de répartition, mais cette approche globale se heurte à plusieurs obstacles : la faible mobilité et la variabilité génétique de ces essences, la forte variabilité spatiale du climat, les variations relatives de régime entre pluies et températures, et l'interaction forte entre climat et fertilité des sites (particulièrement le bilan hydrique) dans la réponse des essences aux changements climatiques. Pour tenter de résoudre ces questions, au moins par rapport au réchauffement du climat, nous avons mis en place des dispositifs d'analyse et de suivi de plusieurs espèces en transect sur des courtes distances le long de grands versants présentant un dénivelé important. Ils permettent d'analyser les variations de productivité et d'état sanitaire des essences en éliminant en grande partie les variations de régime de pluies et température, et la variabilité stationnelle. Cette communication présente le principe méthodologique et ses premières applications dans la région méditerranéenne française.

Mots-clefs : changement climatique ; transect ; pin d'Alep ; pin sylvestre ; productivité ; aire de répartition

Abstract

Monitoring the response of forest trees to climate change can be done at the scale of their distribution area, but this global approach is hampered by several constraints: the weak mobility and the genetic variability of these

species, the spatial variability of the climate, the relative variations of precipitation and temperature patterns and the strong interaction between climate and site fertility (particularly water balance) in the response of trees to climate change. To solve these problems, at least with regard to climate warming, we set up special experimental designs on transects along regular mountain slopes presenting a wide elevation span on short distances. They allow analyzing the variations of productivity and health status with homogeneous rain and temperature patterns and low site condition variability. In this presentation, we introduce the method and give an example of its first development in the French Mediterranean region.

Keys-words: climate change; transect; Pinus halepensis; Pinus silvestris; productivity; distribution area

1. Contexte de l'étude

L'accélération de la croissance des arbres au cours du XX^{ème} siècle, en hauteur ou diamètre, fait l'objet de résultats concordants dans tout l'hémisphère Nord (Diaz *et al.*, 1997). Becker *et al.* (1994) à l'échelle de la France, ainsi que Spiecker *et al.* (1996) pour l'Europe l'ont démontré chez les feuillus comme chez les résineux, tous types de traitements sylvicoles confondus. Selon les espèces et les régions, l'origine de cette accélération remonte de quelques dizaines d'années à un peu plus d'un siècle. Quelques études montrent que les réactions les plus significatives de la croissance radiale, notamment lorsqu'elles vont à l'encontre de la tendance générale, se produisent dans les peuplements localisés en limite d'aire de répartition (Keller *et al.*, 1997; Rathgeber *et al.*, 2000a; 2000b).

La communauté scientifique s'accorde pour interpréter ces variations de croissance comme une combinaison de plusieurs changements majeurs dans l'environnement : sont mis en cause notamment les changements climatiques dus à l'augmentation de la concentration des gaz à effet de serre, un effet direct fertilisant du CO₂ atmosphérique, un enrichissement des sols en matières azotées issues de la pollution atmosphérique et la reconstitution de sols dégradés après abandon de pratiques de surexploitation.

Mais la plupart de ces travaux couvrent des aires géographiques restreintes et une partie seulement de l'aire de répartition des espèces concernées. Car l'analyse des conséquences des changements climatiques sur les essences forestières dans l'ensemble de leur aire de répartition ou sur de longs transects se heurte à plusieurs contraintes :

- la lenteur du cycle de reproduction et la faible mobilité des essences forestières à l'échelle de temps humaine,
- la variabilité spatiale du climat,
- la variabilité génétique des essences,
- 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 un dispositif spécifique (Vila and Vennetier, 2003). Celui-ci a été installé pour

l'instant dans la région méditerranéenne, où les années très chaudes qui se sont succédées depuis 1998, avec leur paroxysme en 2003, semblent avoir mis à mal la végétation.

2. Matériel et méthodes

2.1. Les transects

L'objectif est de pouvoir analyser les variations de productivité et d'état sanitaire d'une ou plusieurs essences en relation avec les changements de température, en éliminant en grande partie les variations de régime de pluies et de variabilité stationnelle susceptibles d'intervenir sur des aires trop étendues. Nous avons donc conçu un modèle de dispositif répondant aux critères suivants :

- transect¹ situé sur 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,
- homogénéité des substrats, des sols et de la topographie le long du transect altitudinal,
- 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 non liées au climat,
- combinaison de ces dispositifs avec des suivis à plus vaste échelle (régionale à nationale ou plus).
- comparaison 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 l'étude de la productivité des peuplements, notre approche est basée en partie sur la dendroécologie² (Fritts, 1976). 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 à 20 arbres, la norme en dendroécologie), situées aux altitudes où l'on a ajouté au transect des placettes de plusieurs niveaux de bilan hydrique stationnel,
- des placettes intermédiaires plus petites (5 à 7 arbres) mais nombreuses, traitées en moyenne glissante avec les grandes. A travail équivalent, cette conception facilite

¹ Un transect est une succession plus ou moins régulière 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).

² La dendroécologie est l'étude des cernes de croissance des arbres et des relations entre ces cernes, l'environnement et le climat. Elle permet, grâce à une analyse au pas de temps annuel et à la longévité des arbres, de « remonter le temps » de plusieurs dizaines à plusieurs milliers d'années.

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. La moyenne glissante des petites placettes est validée par comparaison avec les grandes.

Le premier dispositif suivant ces principes (figure 1), a été installé en 2001 dans le massif de la Sainte-Baume (Bouches du Rhône). L'analyse des données qui en sont issues valide l'intérêt et la pertinence de la méthode. Il est destiné à étudier le déplacement de la limite entre les aires du pin sylvestre (*Pinus sylvestris* L.) et du pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.), l'évolution de leur productivité depuis le début du 20^{ème} siècle, et l'impact de la canicule 2003.

Ces deux pins sont les conifères dominants de la zone Méditerranéenne française, respectivement dans l'arrière-pays et le secteur côtier (Barbéro *et al.*, 1998). Le pin sylvestre a une immense aire de répartition pan-européenne, le pin d'Alep un aire circum-méditerranéenne. Sur ce site, pin sylvestre et pin d'Alep sont mélangés dans une bande étroite (quelques km de large), à l'extrême limite de leur aire de répartition respective.

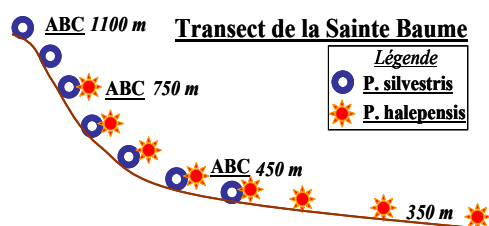


Figure 1. Coupe transversale sur le versant Nord de la Sainte-Baume. Les placettes du transect sont homogènes pour la fertilité et le bilan hydrique. A trois altitudes différentes, des placettes complémentaires sont choisies à 3 niveaux contrastés de bilan hydrique (notés ABC).

2.2. Les mesures

Chaque arbre par placette fait l'objet de 3 carottages à coeur à la tarière de Pressler. Les largeurs de cernes de ces carottes, après séchage, ponçage et interdatation³, sont mesurés au 1/100^{ème} de mm avec un mesureur microscopique Eklund (ADDO®).

Pour calculer l'évolution de la productivité des placettes en relation avec le climat, et comparer les différentes placettes entre elles, nous avons éliminé au préalable les variations liées à l'évolution normale de cette productivité avec l'âge. Pour cela, un modèle général a été calculé pour chaque espèce⁴, et soustrait aux valeurs mesurées.

³ L'interdatation est la mise en correspondance des cernes de croissance avec leur année de formation ou, lorsqu'on ne dispose pas de dates précises (archéologie, paléocécologie), la mise en correspondance d'un ensemble d'échantillons.

⁴ Ces modèles ont été calculés en moyennant les courbes de productivité de l'ensemble des arbres enregistrés dans les bases de données de l'IMEP et du Cemagref sur la région méditerranéenne, soit plus de 700 arbres de tous âges.

3. Les possibilités d'analyse offertes par le dispositif : principaux résultats

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.

3.1. L'importance de la station

Le choix d'un type de roche homogène sur l'ensemble du transect nous a affranchis d'un contrôle détaillé de la richesse trophique, qui serait nécessaire dans d'autres contextes. En revanche, pour la zone méditerranéenne, où l'eau est le facteur limitant durant la saison de végétation (Daget, 1977), la connaissance du bilan hydrique est primordial.

A altitude identique, la réactivité au climat et aux changements d'environnement pour une espèce donnée dépend beaucoup du bilan hydrique local (figure 2).

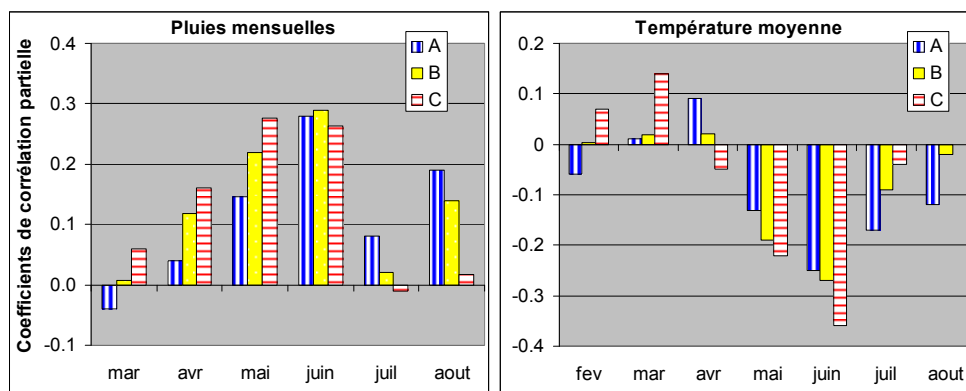


Figure 2. Variations de la réponse du pin sylvestre (accroissement en diamètre) au climat à moyenne altitude en fonction du bilan hydrique du site : A = favorable, B = moyen, C = défavorable. (En ordonnée : coefficients de corrélation partielle⁵ des paramètres climatiques mensuels dans la régression PLS⁶ qui sert de base au modèle climat/largeur de cernes).

Plus le bilan hydrique est défavorable, plus les arbres sont sensibles aux pluies du début du printemps car ils ne bénéficient pas longtemps des réserves de l'hiver. D'autre part, des températures très élevées sont systématiquement néfastes au pin sylvestre dans sa période de croissance, et ce d'autant plus que le bilan hydrique de la station est défavorable.

⁵ Plus la valeur absolue de ce coefficient est élevée, plus l'arbre est sensible aux valeurs du paramètre climatique concerné. Le signe du coefficient indique si des valeurs fortes du paramètre (par ex. températures élevées ou pluies abondantes) sont favorables (coef. positif) ou défavorables (coef. négatif).

⁶ Régression PLS = Partial Least Square regression. Méthode de régression multivariée dédiée à l'analyse de jeux de données dont les variables explicatives sont nombreuses ou corrélées et dont les observations sont peu nombreuses.

Sur les plus mauvaises stations, (figure 2 : stations C), les pins sylvestres arrêtent leur croissance dès le début de l'été et s'installent dans une phase de forte dormance, ce qui les rend peu sensibles au climat de l'été et de l'automne. Sur les bonnes stations (figure 2 : stations A), où le sol et la topographie permettent de conserver longtemps les réserves en eau constituées en hiver, la croissance des arbres dépend moins des premières pluies de printemps. Elle peut se poursuivre en début d'été et reprendre après une pause estivale lorsque la fin d'été est favorable. De ce fait, les arbres sont sensibles aux températures élevées de l'été.

3.2. Le principe des moyennes glissantes

L'analyse par moyenne glissante des petites placettes a été validée par comparaison avec les résultats des grandes placettes correspondantes. Elle permet de visualiser les variations de réponse des arbres au climat en fonction du gradient thermique le long du versant.

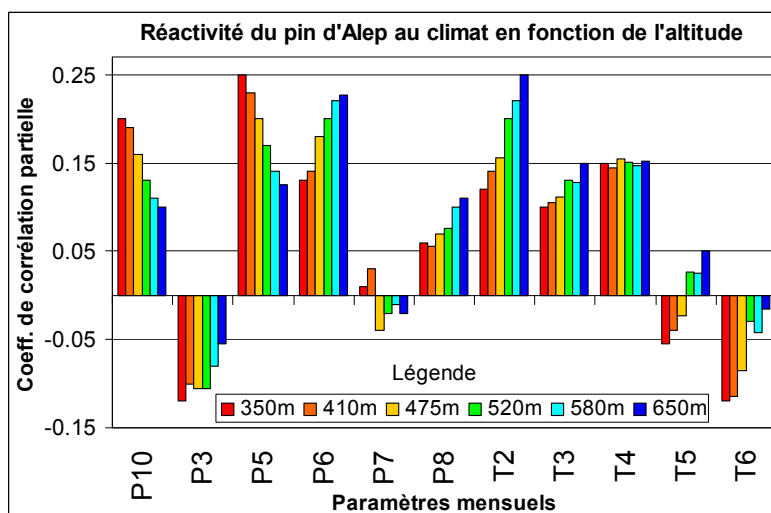


Figure 3. Réactivité de la croissance radiale du pin d'Alep aux paramètres climatiques mensuels (pluie = P, température moyenne = T, nombre = n° du mois - ex.: P6= pluies de juin) en fonction de l'altitude, pour un bilan hydrique stationnel moyen (placettes B). La classe d'altitude représente la moyenne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

Sur la figure 3, on observe que, pour le pin d'Alep, la réponse aux précipitations et températures mensuelles varie régulièrement avec l'altitude. On note surtout que les variations sont significatives pour des faibles différences d'altitude : l'écart entre les groupes extrêmes n'est que de 300 m, correspondant à 1.8°C de température moyenne annuelle. Il y a moins de 100 m d'altitude moyenne entre groupes voisins.

3.3. Variations de productivité

Comme le montre la figure 4, la croissance du Pin d'Alep s'est accélérée au cours du 20^{ème} siècle, indépendamment de l'altitude et du bilan hydrique stationnel, tandis que celle du Pin

sylvestre a diminué fortement dans sa zone de prédilection, au dessus de 800 m d'altitude (Vila et al., 2008).

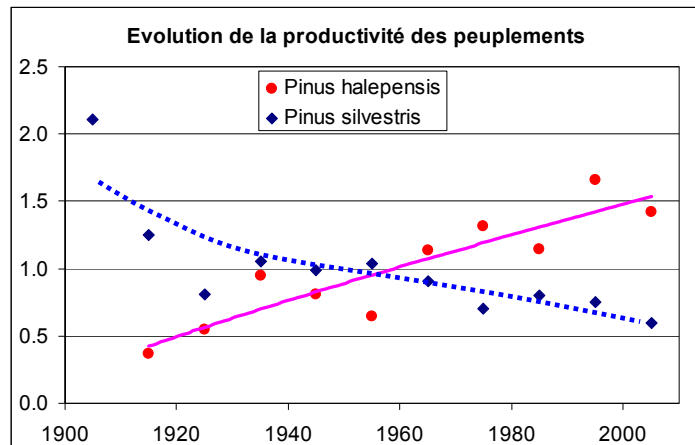


Figure 4. Evolution de la productivité de *P. halepensis* (toutes classes d'altitude confondue) et *P. silvestris* (au dessus de 800m) pendant le 20^{ème} siècle. La valeur 1 est relative à la moyenne sur la Sainte-Baume pour chaque espèce et pour la période considérée. En valeur absolue, la productivité du pin d'Alep est ici, à altitude égale, 2 à 3 fois supérieure à celle du pin sylvestre.

Cependant, le transect avec ses nombreuses placettes a permis, dans l'extrême limite de l'aire du pin sylvestre, de déceler un phénomène opposé à la tendance majoritaire : étonnamment, la productivité des rares peuplements de pins sylvestres situés en dessous de 500 m a augmenté au cours du 20^{ème} siècle, cette tendance s'affaiblissant avec l'altitude pour être stable vers 700 m et inverse à partir de 800 m (figure 5). La progressivité de ce phénomène sur l'ensemble des placettes élimine l'hypothèse d'un cas particulier isolé.

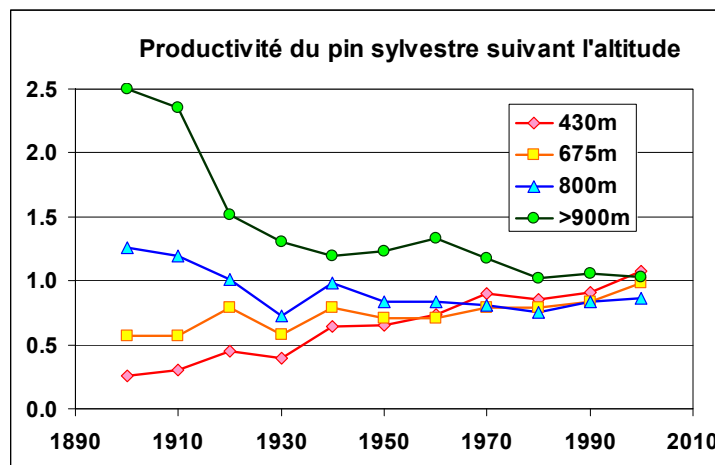


Figure 5. Evolution relative de la productivité du pin sylvestre en fonction de l'altitude. La base 1 correspond à la moyenne de l'espèce sur le site de la Sainte Baume.

4. Discussion

4.1. Aspects méthodologiques

Les différences de réactivité des espèces observées entre placettes ayant des niveaux de bilan hydrique contrastés sont du même ordre de grandeur que celles entre placettes d'altitudes extrêmes de notre dispositif. La prise en compte du bilan hydrique stationnel est donc obligatoire pour une analyse fiable de l'influence de gradients climatiques, quelle que soit l'échelle du gradient. Elle l'est d'autant plus si d'autres paramètres comme le régime de pluie ou de température varient entre placettes.

En observant la variabilité de la réaction des arbres aux faibles différences actuelles de températures liées au gradient altitudinal, on peut émettre l'hypothèse que le réchauffement du climat est susceptible de modifier très rapidement le comportement des arbres. L'augmentation d'environ 1°C sur la zone d'étude au cours du 20^{ème} siècle pourrait ainsi expliquer partiellement les fortes modifications des rythmes de croissance mesurées sur nos placettes (figure 4), et un réchauffement encore plus important est annoncé pour le 21^{ème} siècle (I.P.C.C., 2007). Ce réchauffement global, ainsi que les accidents qui l'accompagnent, pourront avoir des effets très différenciés sur les peuplements en fonction de leur position relative dans l'aire de répartition des espèces concernées (Jolly *et al.*, 2005). Pour observer les variations sur la totalité de la tranche altitudinale d'une ou plusieurs espèces, et les suivre sur une longue période, les dispositifs en transect doivent donc couvrir des gradients aussi larges que possibles. Des phénomènes particuliers pouvant se produire aux limites des aires de répartition, il est judicieux de prévoir une densité de placettes supérieures au niveau de ces limites. Les transects recoupant la limite de plusieurs espèces, avec des peuplements mélangés ou voisins, sont particulièrement intéressants. Ils permettent de mieux comprendre ce qui différencie les espèces, et comment les changements climatiques et environnementaux observés modifient les avantages compétitifs relatifs de chacune.

4.2. L'avenir des pins méditerranéens

Le comportement particulier du pin sylvestre à très basse altitude, pratiquement en dehors de son aire potentielle, a probablement, au moins pour partie, une origine génétique. Les arbres de très basse altitude représentent des faibles surfaces, en petits peuplements parfois très isolés. Ils ont été naturellement sélectionnés depuis plusieurs générations dans un contexte de fortes sécheresses récurrentes et de températures élevées. Leur morphologie a été façonnée, dès le début de leur croissance, par ces conditions extrêmes pour l'espèce : ratio biomasse racinaire / biomasse aérienne élevé, faible hauteur (Larcher, 1995). Ces adaptations pourraient expliquer qu'ils aient mieux supporté le réchauffement climatique que les arbres de plus haute altitude, installés depuis de nombreuses générations dans des conditions climatiques plus fraîches et moins arides. Par contre, les arbres de très basse altitude ont particulièrement souffert des températures extrêmes de l'année 2003, après lesquelles une rapide et forte mortalité a été enregistrée. Cela démontre que lors de cet événement, un seuil critique de température a été dépassé malgré la relative adaptation locale de l'espèce.

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 en altitude et en latitude avec l'élévation de la température et les sécheresses répétées, comme le suggèrent Quézel et Médail (2003). A l'aide d'un modèle bioclimatique basé sur l'analyse floristique (Vennetier et al., 2008b), nous avons cartographié l'aire potentielle du pin sylvestre dans la région de la Sainte-Baume à la fin du 20^{ème} siècle (figures 6.a). En appliquant à ce modèle un changement climatique modérément optimiste pour la fin 21^{ème} siècle (+2.5°C, -10% pluies de printemps), on constate la disparition complète de cet aire potentielle et la remontée significative de celle du pin d'Alep (figure 6.b). Cette simulation se trouve confirmée par les observations de terrain : des pins d'Alep âgés d'environ 20 ans se rencontrent maintenant à près de 1000 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. La tendance à la baisse de productivité du pin sylvestre, observée sur la Sainte Baume jusqu'à 1100 m d'altitude, se poursuit au-delà de cette limite, jusqu'à 1500 m d'altitude (Thabeet, 2008). Au ralentissement de la croissance, s'ajoute le dépérissement de cette espèce amorcé en 2003 et qui s'accroît depuis dans la partie basse et méridionale de son aire (Vennetier et al., 2008a).

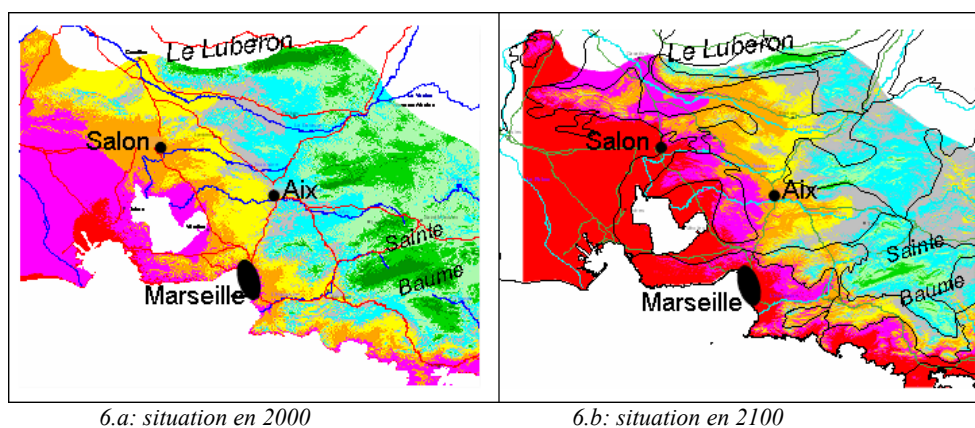


Figure 6 : Evolution simulée au 21^{ème} siècle des aires potentielles du pin sylvestre (vert foncé de 6.a) et du pin d'Alep (du rouge au jaune: faible productivité, du gris au vert moyen: forte productivité). Scénario +2.5°C et -10% pluies de printemps.

Afin de compléter notre dispositif pour couvrir la totalité de l'aire potentielle du pin d'Alep, une étude similaire a été réalisée en Tunisie. 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. 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 inférieure d'aire (El Korchani, 2006).

4.3. Extrapolation à l'écosystème forestier méditerranéen

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

Les scénarios actuels d'évolution du climat, qui évoquent des accroissements de températures oscillant entre + 2°C et + 6 °C, font craindre des changements majeurs dans le fonctionnement des écosystèmes méditerranéens. 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. Leur observation fiable dans des conditions comparables entre sites est donc plus que jamais nécessaire.

Conclusion et perspectives

D'un point de vue méthodologique, notre approche par transects locaux, donnant des indications fines sur le comportement des espèces en limites de leur aire, pourrait être étendue à de nombreuses espèces et régions en complément des gros dispositifs d'observation nationaux ou européens. Elle pourrait être étendue à la régénération de ces essences forestières.

Sur le plan écologique, des travaux complémentaires sont nécessaires sur le comportement des espèces arbustives et herbacées (inventaires floristique, analyse de la structure de végétation, ...). La mise en place de placettes permanentes pour ces aspects sur les placettes de dendroécologie serait un des meilleurs moyens de suivre simultanément les modifications de la croissance et de la santé des arbres, et les modifications de l'ensemble de l'écosystème.

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.

Références bibliographique

- Barbéro M., Loisel R., Quézel P., Richardson D.M., Romane F., 1998<; Pines of the mediterranean basin. In: *Ecology and biogeography of Pinus*, (ed. Richardson D.M.), Cambridge University Press, Cambridge, p. 153-170.
- 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 19e siècle. *Revue forestière française*, vol. XLVI, n° 4, p. 335-341.
- 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.
- El Korchani A., 2006. *Impact des changements climatiques récents sur la croissance radiale de trois pins méditerranéen (Pin d'Alep, Pin pignon et Pin maritime) en Tunisie.*, IMEP, Aix-Marseille III, Marseille, 170 p.
- Fritts H.C., 1976. *Tree ring and climate*. Academic Press, New York, 567 p.
- I.P.C.C., 2007. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M., Miller, H.L. eds. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 p.
- Jolly W.M., Dobbertin M., Zimmermann N.E., Reichstein M., 2005 Divergent vegetation growth responses to the 2003 heat wave in the Swiss Alps. *Geophysical Research Letters*, vol. 32, n° 18.
- Keller T. ; Tessier L., 1997. Climatic effect of atmospheric CO2 doubling on radial tree-growth in southeastern France. *Journal of Biogeography*, n° 24, p. 857-864.
- Larcher W., 1995. *Physiological Plant Ecology*, 3rd edition., Springer-Verlag, Berlin, 602 p.
- 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*, vol. 24, n° 2, p. 87-94.
- Quézel P., Médail F., 2003. *Ecologie et biogéographie des forêts du bassin méditerranéen*. Elsevier, Paris, 571 p.
- Rathgeber C. ; Guiot J. ; Edouard J.L. (2000a) Using a biochemical model in Dendroecology. Application to *Pinus cembra*. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, série III, vol. 323, n° 5, p. 489-497.
- Rathgeber C. ; Nicault A. ; Guiot J. ; Keller T. ; Guibal F. ; Roche P. (2000b) Simulated responses of *Pinus halepensis* forest productivity to climatic change and CO2 increase using a statistical model. *Global and Planetary Change*, vol. 26, n° 4, p. 405-421.
- Root T.L. ; Price J.T. ; Hall K.R. ; Schneider S.H. ; Rosenzweig C. ; Pounds J.A. (2003) Fingerprints of global warming on wild animals and plants. *Nature*, vol. 421, n° 6918, p. 57-60.

Spiecker H. ; Mielikäinen K. ; Köhl M. ; Skovsgaard J.P. (1996) *Growth trends in European forests : studies from 12 countries*. Springer-Verlag, Heidelberg, 372 p.

Thabeet A. (2008) *Réponse du pin sylvestre (Pinus sylvestris L.) aux changements climatiques récents en région méditerranéenne française: spatialisation et quantification par la télédétection et la dendrochronologie*. Thèse de doctorat, IMEP, Cemagref Aix en Provence, Université Paul Cézanne, Marseille, 261 p.

Vennetier M. ; Borgniet L. ; Thabeet A. ; Gadbin-Henry C. ; Ripert C. ; Vila B. ; Prévosto B. ; Estève R. ; Martin W. ; N'diaye A. (2008a) *Impact de la canicule 2003 sur les peuplements résineux de la région PACA. Rapport final*. Cemagref, Aix en Provence, 22 p.

Vennetier M. ; Ripert C. ; Maillé E. ; Blanc L. ; Torre F. ; Roche P. ; Tatoni T. ; Brun J.-J. (2008b) A new bioclimatic model calibrated with flora for Mediterranean forested areas. *Annals of Forest Science*, vol. 65, n° (sous-press).

Vila B. ; Vennetier M. ; Ripert C. ; Chandioix O. ; Liang E. ; Guibal F. ; Franck T. (2008) Has global change induced opposite trends in radial growth of *Pinus sylvestris* and *Pinus halepensis* at their bioclimatic limit? The example of the Sainte-Baume forest (south-east France). *Annals of Forest Science*, vol. 65, n° 7 (under press).