



REPONSE DES FORETS MEDITERRANEENNES FRANÇAISES AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES

RESPONSE OF THE FRENCH MEDITERRANEAN FORESTS TO CLIMATIC CHANGES

Programme **APR GICC 2003**
Rapport de fin de contrat

CEREGE
UMR 6635 CNRS/Université Paul Cézanne
Europôle Méditerranéen de l'Arbois BP 80
F-13545 Aix-en-Provence cedex 4

Joël Guiot
guiot@cerege.fr

Date : 21/06/2007

N° de contrat : **XXXXXX**
Date du contrat : **01/05/2005**

PARTICIPANTS

CEREGE, Aix-en-Provence : J. Guiot (DR1 CNRS), C. Gaucherel (post-doc appointé sur le projet)

IMEP, Aix-en-Provence : F. Guibal (CR1, CNRS), JL Edouard (CR1 CNRS), A. Thomas (IR CNRS), N. Denelle (IR CNRS)

CEFE-DREAM, Montpellier : S. Rambal (IR1, CNRS), F. Mouillot (CR IRD), JP Ratte (chercheur appointé sur le projet), R. Joffre (DR2, CNRS), JM Ourcival (IR CNRS), L. Misson (CR1 CNRS)

INRA-URFM, Avignon : R. Huc (CR1, INRA), A. Porté (CR INRA), H. Davi (CR INRA)

CEMAGREF, Le Tholonet : M. Vennetier (IDTEF, CEMAGREF), C. Ripert (IE, CEMAGREF), T. Curt (IE, CEMAGREF)

MEDIAS-France, Toulouse : M. Hoepffner (DR, IRD), H. Makhmara (IR)

RAPPORT DE SYNTHÈSE

(destiné aux utilisateurs et gestionnaires publics)

REPONSE DES FORETS MEDITERRANEENNES FRANÇAISES AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES

APR GICC 2003

Rédacteur : J. Guiot

avec : F. Guibal, R. Huc, L. Misson, S. Rambal, J.P. Ratte, M.
Vennetier

CONTEXTE GENERAL

Le biome méditerranéen (présent sur quatre continents) est considéré, à juste titre, comme un « hotspot » de biodiversité : avec seulement 2% de la surface terrestre du globe, il contient près de 20% de la diversité totale des plantes¹. La région du bassin Méditerranéen constitue un modèle pour l'étude des changements globaux (climatiques et anthropiques)² car elle est située dans une zone de transition sur le plan bioclimatique dont la complexité est amplifiée par la topographie et qui la rend très sensible à tout changement. La partie nord du bassin subit une évolution très différente de son versant sud³, avec une extension des zones boisées due à la déprise agricole. Les forêts sont cruciales pour préserver cette biodiversité et fournir des services écosystémiques essentiels, tels que la protection des sols, la conservation des ressources en eau et la régulation du climat⁴. Les modèles climatiques prédisent, pour le 21^e siècle, un réchauffement significatif et une décroissance des précipitations⁵, qui peuvent déclencher une rétroaction positive sur le climat en décroissant la séquestration du CO₂ dans les écosystèmes.

La caractéristique principale du climat Méditerranéen est la fréquence et l'intensité d'événements extrêmes (canicules, fortes pluies) et une augmentation de ces derniers est attendue pour les prochaines décennies⁶. Un bon exemple est la canicule de 2003 qui a causé une réduction de 30% de la productivité primaire en Europe et a ainsi annulé l'équivalent de quatre années de séquestration du carbone⁷. Si ce type d'événements extrêmes devient la règle, il est important de comprendre comment les forêts dominantes de la région Méditerranéenne française, à savoir les forêts de pin d'Alep et de chênes verts, vont réagir à ces changements prédits par les modèles climatiques⁸. D'un point de vue plus pratique, mieux comprendre comment vont se déplacer altitudinalement ces espèces en réponse aux changements climatiques peut aider le gestionnaire à prendre des décisions sur la façon optimale de gérer ces forêts afin de mitiger, autant faire se peut, les conséquences des

¹ Medail, F., 2006. Ecosystems : Mediterranean. Encyclopedia of Ecology, S.E. Jorgensen (ed), Elsevier, Amsterdam, 14p.

² Lavorel, S., Canadell, J., Rambal, S. & Terradas, J. 1998: Mediterranean terrestrial ecosystems: research priorities on global change effects. — *Global Ecol. Biogeogr. Letters* 7: 157-166.

³ Barbero, M. & Quézel, P. 1995. Desertification, desertisation, aridification in the Mediterranean region and global change. In: D. Bellan, G. Bonin & C. Emig (eds.), *Functioning and dynamics of natural and perturbed ecosystems*, Pp. 549-569.

⁴ Eamus, D. et al., 2005. Ecosystem services: an ecophysiological examination. *Australian Journal of Botany*, 53(1): 1-19.

⁵ Gibelin, A.L. & Deque, M., 2003. Anthropogenic climate change over the Mediterranean region simulated by a global variable resolution model. *Climate Dynamics*, 20(4): 327-339.

⁶ Meehl, G.A. and Tebaldi, C., 2004. More intense, more frequent, and longer lasting heat waves in the 21st century. *Science*, 305(5686): 994-997.

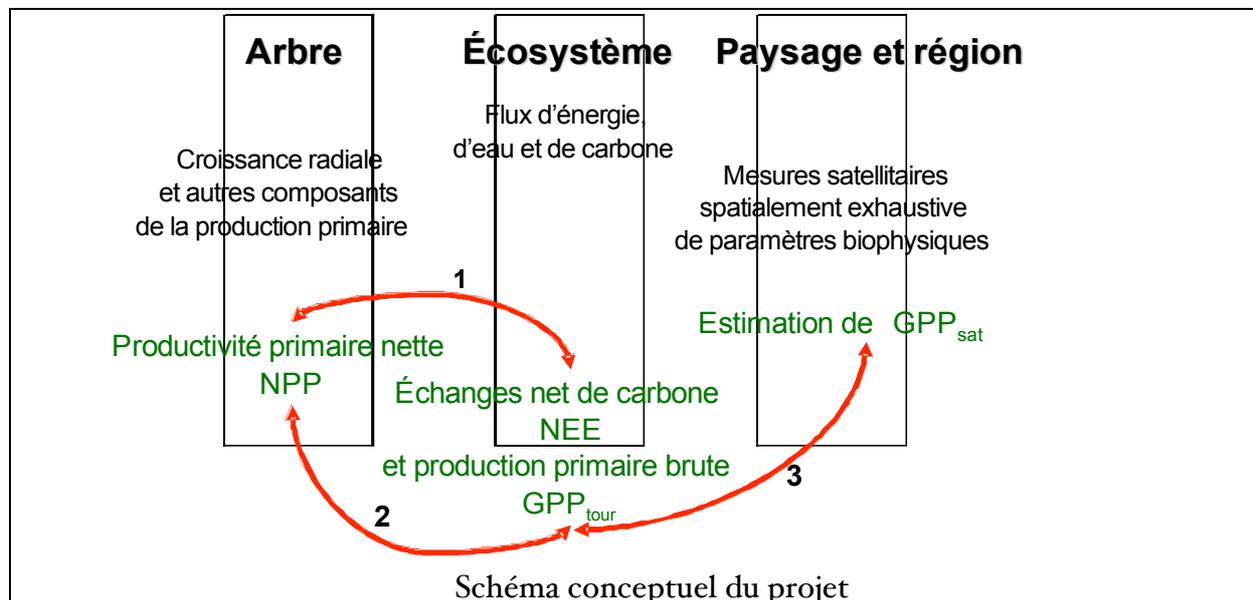
⁷ Ciais, P. et al., 2005. Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003. *Nature*, 437(7058): 529-533.

⁸ IPCC, 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., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp.

changements pressentis. C'est dans ce contexte de changement climatique à l'horizon 2100 que le projet REFORME ambitionne d'apporter sa contribution.

OBJECTIFS GENERAUX DU PROJET

Les objectifs généraux de REFORME sont d'étudier comment les changements climatiques et l'augmentation du taux de CO₂ atmosphérique affectent et vont affecter la productivité d'espèces forestières méditerranéennes et la structure des paysages. On s'intéresse également au devenir des peuplements actuels face aux modifications des perturbations induites par les changements climatiques sur les paysages, leur diversité et leur structure. Les espèces-modèles retenues sont le pin d'Alep et le chêne vert. L'objectif final est de fournir aux décideurs forestiers des informations sur l'évolution des peuplements forestiers au niveau régional, notamment sur l'évolution des paysages, mais également des informations locales plus précises sur l'évolution de la forêt, en fonction de sa situation géographique mais également en fonction des caractéristiques du milieu dans lequel il se développe (topographie, sol, structure).



Pour atteindre cet objectif général, il est nécessaire de mettre en place une stratégie d'analyse de données, en stations de mesure mais également le long de grands gradients spatiaux, et de modélisation. En particulier, notre approche passe par la comparaison de différents paramètres liés au cycle du carbone (NEE, NPP, GPP) soit mesurés par la tour de flux, soit modélisés à partir de données satellitaires.

Pour peaufiner nos modèles, de nombreuses données de terrain ont été mesurées et/ou compilées. Elles ont permis d'analyser l'impact du climat sur la mise en place, la croissance et la survie des organes aériens du pin (tiges, aiguilles, floraison, fructification) et sur la croissance annuelle des arbres (approche dendrochronologique). Ces éléments doivent permettre de mieux comprendre les processus d'allocations de ressources (carbone, etc...) au sein de la plante.

Du point de vue des événements extrêmes, on a essayé d'établir quelles sont les conséquences des événements climatiques exceptionnels, tels que les canicules, sécheresses et neiges lourdes, qui régulièrement marquent significativement et parfois durablement la productivité des peuplements. Ces événements sont susceptibles de devenir plus fréquents dans le futur et leur prise en compte est nécessaire pour les études de vulnérabilité.

Enfin, via l'utilisation de scénarios climatiques pour le futur (issus ici du modèle ARPEGE) et un modèle de croissance annuelle des arbres, on a voulu tester la sensibilité des deux espèces modèles au changement climatique seul et au changement du taux de CO₂ atmosphérique (effet de fertilisation) afin de mettre ainsi en évidence à quelle échéance les stress éventuels se feront durablement sentir.

QUELQUES ELEMENTS DE METHODOLOGIE

Notre approche s'est articulée autour de mesures en stations équipées de capteurs, des mesures de terrain, essentiellement des séries dendrochronologiques et des mesures d'élongation de tiges et autour de trois modèles de caractéristiques très différentes.

1. Récolte de données et plans d'expérience

Le site de Puéchabon (CEFE-Montpellier), dans l'arrière-pays de Montpellier, est destiné à comprendre le fonctionnement du chêne vert. Il fait partie depuis 1988 de réseaux européens de mesure des flux de carbone (Carboeurope). Il est équipé de nombreux capteurs pour des mesures micro-météorologiques et écophysiologicals, d'une tour à flux et d'un dispositif d'exclusion des pluies qui permet de comprendre l'incidence de stress hydriques contrôlés. Des analyses dendrochronologiques de chênes ont été effectuées dans le cadre de ce projet (IMEP).

Le site de Lamanon (INRA-Avignon), près de Salon-de-Provence, est destiné à comprendre le fonctionnement d'une forêt mélangée (pin, chêne, buis). Son équipement est proche de celui de Puéchabon (à l'exception de la tour à flux et du dispositif de l'exclusion des pluies). En outre, des analyses de sol, de potentiel hydrique, conductivité hydraulique sont régulièrement effectués. A cela s'ajoute des suivis de tiges et de surface foliaire (CEMAGREF).

Le site de Font-Blanche (INRA-Avignon, IMEP-Aix, CEREGE-Aix), située au sud-est d'Aubagne, aurait du être équipé au début du projet. Pour des raisons financières et administratives, il ne l'a été qu'au printemps 2007. Il est également dédié à la forêt mélangée et dispose d'une tour à flux. Des mesures de croissance des organes aériens ont été effectuées dans le cadre de ce projet (CEMAGREF).

Nous disposons également d'un réseau de 21 sites où des séries dendrochronologiques (IMEP) ont été prélevées lors de campagnes antérieures au projet. Ces séries fournissent les épaisseurs et les fluctuations de la densité du cerne au cours de l'année pour différents arbres représentatifs du site.

2. Bases de données, scénarios, données satellitaires

La base de données du CEFE-Montpellier contient des informations sur la répartition des deux espèces-modèles pour les 12 départements de la façade méditerranéenne. La base de données MODIS-TERRA fournit les indices classiques liés à la végétation (NDVI, LAI, GPP ...) à la résolution spatiale allant de 250-1000 m. La roche-mère et la capacité hydrique maximale des sols sont également disponibles pour la modélisation de la végétation.

Les simulations du modèle climatique ARPEGE de Météo-France (résolution 50 km) ont été géo-référencées et interpolées à l'échelle de 1 km (CEFE-Montpellier). Les variables climatiques habituelles (température, précipitation, vent, rayonnement ...) y sont disponibles à l'échelle journalière.

3. Les modèles de végétation

MAIDEN est un modèle mécaniste de croissance d'arbre contrôlé par la météorologie et des données de site (CEREGE-Aix). Les processus pris en compte sont essentiellement ceux du cycle de l'eau et du carbone. Son objectif principal est de reproduire un paramètre annuel proche du cerne d'arbre (accroissement de la biomasse annuelle dans le tronc) et c'est possible par la simulation de l'évolution saisonnière de l'allocation du carbone dans les différents compartiments : racines, feuilles, tronc et réservoir de stockage qui rend disponible une partie du carbone pour les années ultérieures. Ce modèle a été mis au point par Misson (2004)⁹ mais a été amélioré dans le cadre de ce projet. Les différents paramètres empiriques du modèle ont été estimés à partir des mesures de Puéchabon et Lamanon ainsi que des séries dendrochronologiques, en utilisant des algorithmes bayésiens performants. Ce modèle s'est révélé apte à simuler la croissance moyenne annuelle du pin d'Alep (moyenné sur les 21 sites) et celle du chêne vert de Puéchabon.

BILHY est un modèle statistique développé par le CEMAGREF-Aix. Il est basé sur les données floristiques et dendrométriques d'un réseau de 350 placettes représentatives des principaux gradients écologiques, réparties sur l'ensemble de la Provence calcaire. Il permet d'évaluer le bilan hydrique des milieux forestiers et leur productivité potentielle à des échelles qui vont de la région (7000km²) au local (ordre décamétrique). Ce modèle a été retravaillé dans le cadre du projet pour placer les différents travaux du projet dans leur contexte régional.

Le modèle SIERRA (CEFE-Montpellier) est principalement construit pour les milieux limités en eau et soumis à des perturbations récurrentes comme les incendies. Le principe fondamental du modèle est l'utilisation des processus fonctionnels de croissance en biomasse pour simuler la succession des espèces. Ce modèle est utilisé dans le cadre du projet pour le calcul d'indices de sécheresse sur la période 1970-2100.

RESULTATS OBTENUS

1. Fonctionnement du chêne vert

L'approche dendrochronologique est une approche à grande échelle spatio-temporelle. Elle isole difficilement les différents facteurs qui déterminent la croissance d'un arbre, mais elle intègre une grande variabilité à partir de laquelle on peut tirer des enseignements *a posteriori*. Les mesures faites à Puéchabon sont limitées dans l'espace et le temps, mais chaque paramètre de la croissance est mesuré séparément. On accède donc à une résolution des processus très fine, mais sur un nombre limité d'années. Les deux approches tendent à apporter des réponses convergentes sur la croissance du chêne vert. C'est la variabilité des mois d'avril, mai, juin qui dicte la variabilité de l'accroissement (vu par la dendrochronologie) et celle des flux de carbone (vu par la tour à flux). C'est un résultat capital de ce travail, autant pour la communauté des dendrochronologues que des micro-météorologistes. Il sera intéressant de tester cela sur le pin d'Alep dès que les données de NEE seront disponibles à Font-Blanche.

L'approche dendrochronologique n'a pu se faire que sur sept tiges interdatées sur 15 recueillies parmi des sujets dominants. L'étude nous a appris que la dimension de l'échantillonnage sur le chêne vert devait impérativement dépasser celle en vigueur dans les études dendroécologiques standards. Néanmoins – et c'est à la fois la cause de cette insuffisance de réplification et un résultat important de l'analyse - la variabilité inter-

⁹ Misson, L. 2004. MAIDEN: a model for analyzing ecosystem processes in dendroecology. Canadian Journal of Forest Research, **34**, 874-887.

individuelle de l'accroissement du chêne est très forte. Il sera important de comprendre pourquoi : est-ce la méthodologie de lecture des cernes, le micro-environnement, la variabilité génétique, ... Cette approche doit donc se poursuivre et elle débouchera sur des résultats importants.

La GPP (gross primary production), qui est la quantité totale de CO₂ fixée par la plante dans le processus de photosynthèse est un paramètre important pour comprendre comment l'arbre assimile le carbone atmosphérique. Les images satellitaires telles que celles fournies par MODIS est un bon outil pour l'estimer, mais il doit être corrigé. Les problèmes majeurs d'estimation de GPP par le satellite MODIS se situent durant la période estivale, car la sécheresse en région méditerranéenne provient du sol, et non de l'atmosphère. Il y a aussi des défauts sur l'estimation du leaf area index (LAI) qui est systématiquement surestimé par MODIS.

L'effet d'événements exceptionnels comme la vague de chaleur de 2003 a diminué la *GPP* de 12% sans effet majeur sur la respiration de l'écosystème. Les défoliations subies par les arbres en 2005 à la suite d'attaques de chenilles ont diminué la *GPP* de 28% et la respiration de l'écosystème de 11%, avec une augmentation consécutive de la NEE de 66% (donc une diminution du puits de carbone de 66%). Il est intéressant de voir qu'un facteur, comme les attaques de chenilles, peut avoir plus d'effets que de multiples sécheresses sur la vulnérabilité. Cependant, l'augmentation de la température de printemps, risque d'entraîner un accroissement de la fréquence d'attaques de chenilles dans le futur.

2. Fonctionnement du pin d'Alep

Nous avons montré que l'organogenèse et la croissance du pin d'Alep sont sous la dépendance combinée des conditions climatiques de plusieurs années successives. Les accidents climatiques, en particulier canicule et sécheresse fortes, ont des répercussions négatives pluriannuelles sur la croissance, et des effets cumulatifs qui ont pu être mesurés suite à la succession de la canicule de 2003 et de trois années de sécheresse marquées qui l'ont suivie. L'affaiblissement des arbres se traduit par une réduction de 30 à 60% de la taille des aiguilles, du nombre d'aiguille formées, de la longueur des pousses annuelles sur les rameaux et de la fructification. Le polycyclisme disparaît presque entièrement après 3 années de sécheresse.

On montre que le modèle de productivité du pin d'Alep est très sensible à de faibles élévations de la température annuelle et saisonnière. Celles-ci se traduisent par une modification significative du poids relatif des paramètres climatiques dominants dans le modèle, en raison notamment des variations de la longueur et de la précocité de la saison de végétation, et de l'utilisation plus ou moins précoce des réserves hivernales en eau du sol. Ainsi avec le réchauffement, les arbres deviendraient significativement sensibles (négativement) aux températures de mai et juin auxquelles ils étaient jusqu'alors indifférents à altitude moyenne. Les arbres deviendraient aussi plus sensibles au déficit de pluies dès le mois de mai, ce qui accroît la longueur de la période de vulnérabilité à la sécheresse. Ils seraient par contre favorisés par les températures élevées du mois d'octobre de l'année précédente, leur permettant d'accumuler plus tardivement des réserves et éventuellement de poursuivre leur croissance automnale en hauteur et diamètre en cas de polycyclisme tardif. On a vu cependant précédemment que ce polycyclisme était défavorisé par les sécheresses prolongées de printemps.

3. Comparaison du pin d'Alep et du chêne vert

Pour la période 2003-2006, on observe que l'accroissement en hauteur et en diamètre décroît fortement après 2003. Beaucoup d'arbres sont morts ou en cime sèches (30% des

chênes et 20% des pins). Le dépérissement des chênes a été plus fort dans les placettes où il dominait et là où le sol est moins profond. D'autre part le taux de dépérissement des pins est plus fort là où il y a moins de pins et où leur hauteur est la plus importante.

Nous avons observé que, les valeurs de transpiration mesurée sur le pin et sur le chêne restent très inférieures à l'évapotranspiration potentielle. Une forte chute de transpiration intervient généralement en début de saison sèche, lorsque les contraintes hydriques augmentent. La sécheresse édaphique qui intervient en été induit une chute de potentiel hydrique de base. Il y a alors arrêt des échanges gazeux par fermeture stomatique. Dans le cas de ces peuplements mélangés, on constate que cette fermeture intervient plus précocement au cours de la saison sèche chez le pin que chez le chêne. Le pin se comporte donc comme une espèce qui évite la sécheresse tandis que le chêne, grâce à sa situation sous couvert, fonctionne tout l'été sans stress notable. Le pin est également une espèce plus sensible à l'embolie que le chêne.

4. Vulnérabilité du pin d'Alep et du chêne vert au changement climatique

La figure 1 simule un indice d'aridité (WSI) en fonction du temps, à partir du point de grille « Puéchabon » de la simulation d'Arpège. On constate une augmentation continue et linéaire du stress hydrique et augmentation de la fréquence d'événements extrêmes.

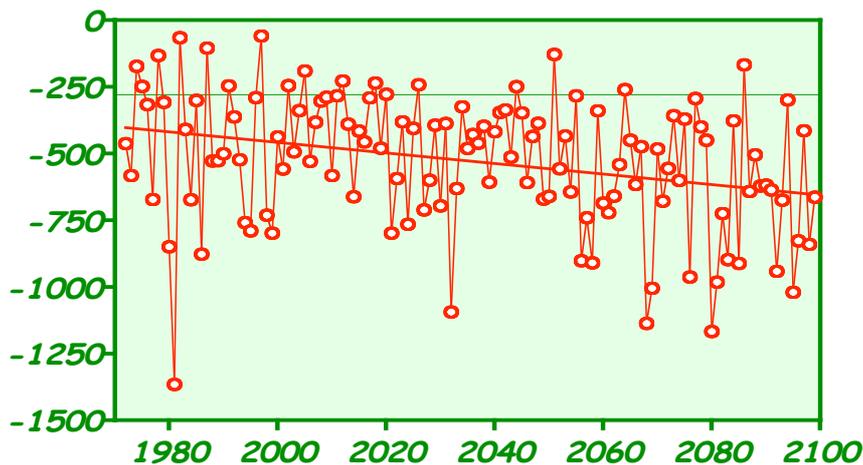


Figure 1. Evolution du WSI (water stress integral) en fonction des changements climatiques simulés par ARPEGE pour le point de grille le plus proche de Puéchabon.

Un modèle d'effets cumulatifs ainsi qu'un modèle de convalescence après accident ont été calibrés pour corriger les prédictions des modèles dendroécologiques qui doivent être habituellement calibrés en excluant les accidents les plus marqués et qui ne sont pas capables de prendre en compte la réduction durable de la surface foliaire et la dégradation de l'état sanitaire des arbres. Ces corrections, appliquées à la prédiction de l'évolution de la productivité du pin d'Alep au 21^{ème} siècle, ont montré une tendance à la baisse dès le début du siècle qui va à l'encontre des simulations qui ne prennent pas en compte cet effet (Figure 2).

Un lien a été établi entre la productivité du pin d'Alep et les indices de bilan hydrique calculés par le modèle. On a pu ainsi évaluer et spatialiser à l'échelle régionale la productivité du pin d'Alep sur un sol moyen et son évolution au cours du 21^{ème} siècle. Le pin d'Alep étant particulièrement sensible aux paramètres locaux du bilan hydrique, une forte interaction existe entre ce bilan local (sol et topographie) et le climat. On a montré, en termes de production de bois, une baisse de 2.5 à 3.5 m³*ha⁻¹*an⁻¹ soit une perte d'environ 28% pour Font-Blanche, et pour Lamanon une baisse de 4 à 5.75 m³*ha⁻¹*an⁻¹ soit une perte de 30%. La perte en production de biomasse totale est du même ordre de grandeur.

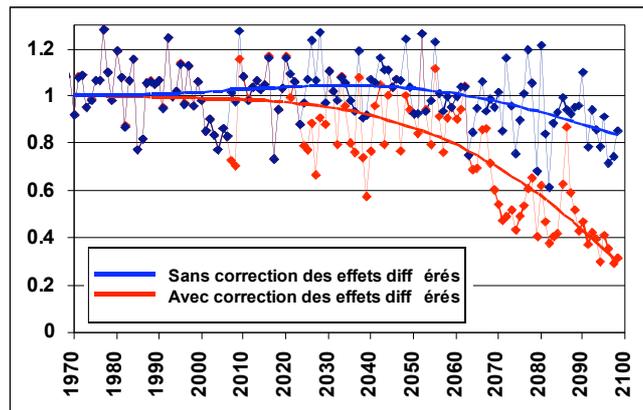


Figure 2 : Simulation de la productivité (indice de croissance dendrochronologique) du pin d'Alep au 21^{ème} siècle. Le fort décrochement à partir des années 2065 vient de la multiplication des épisodes de canicules doublés de sécheresses répétitives au printemps.

Si on considère les résultats de MAIDEN seuls, il semble qu'il y ait un désaccord avec les conclusions que l'on pourrait tirer des mesures. En effet, ces dernières montrent que la sécheresse apporte un préjudice important aux forêts méditerranéennes, tant au pin d'Alep qu'au chêne vert. Les simulations de MAIDEN montrent une productivité stable durant la première décennie du 21^e siècle, malgré les sécheresses observées (Figure 3). De plus, si l'on considère l'effet fertilisation, MAIDEN semble montrer qu'il annihile complètement l'effet du changement climatique. Or, si tel était le cas, les forêts auraient déjà du bénéficier d'une telle fertilisation. On est passé de 1950 à 2000 de 300 ppmv à 375 ppmv de CO₂ (+25%), ce qui ne semble pas avoir augmenté la croissance des deux espèces qui sont restées très sensibles à la sécheresse. Il semblerait donc que les événements climatiques extrêmes mais rares ont plus d'effets que les changements climatiques faibles mais continus. Plusieurs processus du modèle MAIDEN doivent certainement être revus ou ajoutés : allocation de C, acclimatation aux changements de CO₂, qualité de la matière organique, effets différés dus à la dégradation de l'état sanitaire des arbres et à la réduction de la surface foliaire...

Une autre explication est liée aux simulations d'ARPEGE. Le scénario utilisé n'est pas complètement en accord avec le climat observé. En effet, au contraire de ce dernier qui montre une aridité croissante durant les dernières décennies du 20^e siècle, les simulations font état d'une aridité décroissante durant la même période, principalement due à une légère baisse des températures (0.5°C sur les 20 dernières années du 20^e siècle) et une stabilité des précipitations. Ce peut être la raison pour laquelle l'aridité simulée par ARPEGE n'est pas suffisante pour marquer une croissance avant 2020 (c'est à ce moment qu'elle dépasse les valeurs du 20^e siècle).

La comparaison des simulations entre le chêne et le pin d'Alep donne des résultats intéressants (Figure 3). En effet, les deux espèces arrivent à un maximum durant la première décennie du 21^e siècle, mais la productivité du chêne plafonne à 1.8 Tg*ha⁻¹*an⁻¹ tandis que le pin plafonne à 5.7 Tg*ha⁻¹*an⁻¹, soit un facteur 3.2. Ensuite, la sécheresse s'accroissant, les espèces voient leur productivité diminuer jusqu'à la fin du 21^e siècle, la première vers 1.3 Tg*ha⁻¹*an⁻¹ (72%) et la seconde vers 5.3 Tg*ha⁻¹*an⁻¹ (92%). Le pin semble donc devoir résister mieux au stress hydrique (pris isolément). Si on prend en compte l'effet de fertilisation, les deux espèces semblent résister beaucoup mieux puisque le chêne atteindra, à la fin du 21^e siècle, une productivité moyenne de 2 Tg*ha⁻¹*an⁻¹ (110%) et le pin de 6.7 kg*ha⁻¹*an⁻¹ (118%). Ces valeurs doivent être vues en termes de tendance : la fertilisation par

le CO₂ commencerait, pour le climat simulé par ARPEGE, à mitiger l'effet de l'aridité à partir du début du 21^e siècle et le pin devrait résister nettement mieux que le chêne vert.

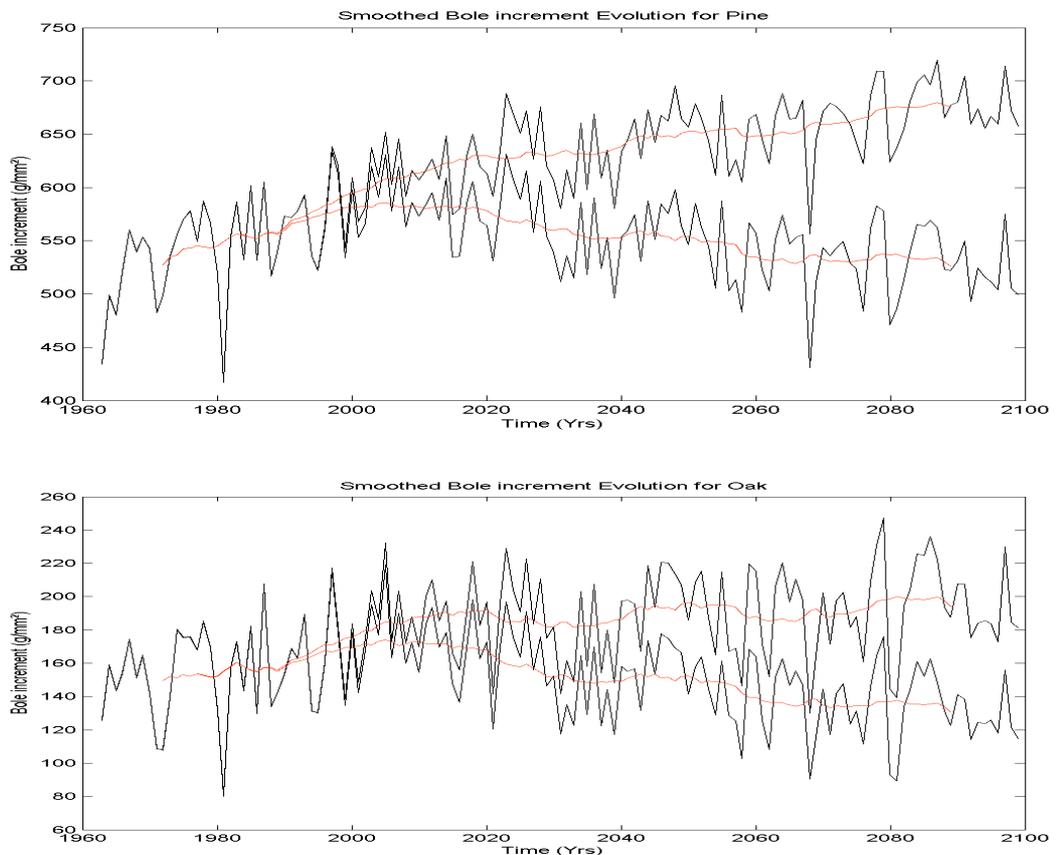


Figure 3 : Courbes de production annuelle moyenne du pin d'Alep (graphique supérieur) et du chêne vert (inférieur) de la région du Sud Est à partir des scénarios d'ARPEGE avec (courbe supérieure) et sans (courbe inférieure) effet direct du taux de CO₂ atmosphérique. Les courbes rouges correspondent à une moyenne glissante sur 20 ans.

Cette évolution positive de la croissance n'est pas confirmée par le modèle de convalescence (figure 2) qui prend en compte les effets différés. Cependant cette prise en compte des effets différés est statistique, ce qui peut rendre problématique toute extrapolation en dehors des limites de calibration. De plus, il ne prend pas en compte la fertilisation par le CO₂. Notre modélisation est mécaniste, mais elle ne permet pas encore de prendre en compte les effets des événements extrêmes des années précédentes. Si on essaie de combiner qualitativement les deux approches, on peut suspecter que l'augmentation de la fréquence des événements extrêmes diminuera la productivité des deux espèces au cours du 21^e siècle (au lieu de l'augmenter comme le suggère MAIDEN), mais que l'effet de fertilisation leur permettra de mieux résister.

IMPLICATIONS PRATIQUES, RECOMMANDATIONS, REALISATIONS PRATIQUES, VALORISATION

1. Implications pratiques :

Les implications pratiques sont de deux ordres : méthodologique et écologique.

D'un point de vue méthodologique, nos trois approches de modélisation ont montré les directions à prendre pour aboutir à une modélisation plus exhaustive de la vulnérabilité du pin d'Alep et du chêne. L'approche MODIS/GPP permet d'intégrer de larges zones avec l'ensemble des espèces qui y poussent. Il reste cependant du travail à effectuer pour que l'estimation de la GPP par image satellite soit plus proche de la réalité en ce qui concerne l'effet des sécheresses et l'estimation de l'indice foliaire. Une des pistes qui s'ouvrent, suite à la bonne corrélation obtenue entre la NEE et la série dendrochronologique du chêne vert, est de comparer de manière plus systématique et quantitative les deux types de données. L'approche « modèle à effets différés » et la faiblesse de certains résultats de MAIDEN montre qu'il sera nécessaire d'améliorer MAIDEN en ce qui concerne les processus suivants : allocation de C, acclimatation de la photosynthèse aux changements de CO₂, prise en compte de la qualité de la matière organique, effets différés dus à la dégradation de l'état sanitaire des arbres et à la réduction de la surface foliaire.

Du point de vue écologique, nos résultats doivent être pris comme des indications sur l'évolution potentielle des deux espèces en réponse au changement climatique. Comme on s'y attendait, la sécheresse est le facteur clé déterminant la productivité et la vulnérabilité des forêts méditerranéennes. L'effet négatif de ce facteur est amplifié par l'augmentation en fréquence et en intensité des événements extrêmes. Les dégâts d'une année de canicule comme 2003 sont amplifiés par la prolongation durant deux ans du déficit hydrique au point qu'il faut plusieurs années pour reconstituer la surface foliaire. A cela, il faut ajouter que l'augmentation de la température au printemps peut favoriser l'invasion de chenilles (*Lymanthria dispar*) comme c'est arrivé en 2006 à Puéchabon. Cette invasion a eu des effets nettement plus importants que la sécheresse de 2003. On peut donc craindre une répétition plus fréquente de successions sécheresses-parasites avec des effets fortement amplifiés. Même si notre approche de modélisation n'est pas parfaite, on peut en déduire que le CO₂ atmosphérique, par son effet de fertilisation, peut limiter quelque temps la réduction de la productivité des forêts méditerranéennes, si le temps de retour d'événements extrêmes laisse le temps aux forêts de récupérer. Enfin le pin d'Alep semble mieux à même de résister que le chêne vert.

2. Recommandations et limites éventuelles :

Nos résultats ont des limites liées à la fois aux données et aux modèles. Nos mesures ne couvrent pas encore des périodes de temps optimales. On peut cependant en tirer des enseignements robustes car la dernière décennie a connu des événements extrêmes variés qui ont permis de comprendre comment le pin et le chêne peuvent réagir à des variations fortes du climat. Les données dendrochronologiques et les mesures d'élongation de tiges sont assez exhaustives pour le pin d'Alep, mais sont encore restreintes pour le chêne vert. Les modèles de végétation ont encore beaucoup de lacunes qu'il conviendra de combler progressivement dans le futur. Enfin, nos études de vulnérabilité sont basées sur un seul scénario d'un seul modèle climatique. Elles n'ont donc pas de valeur de prévision mais simplement une valeur d'indication. Il sera nécessaire, pour compléter cette approche, d'utiliser des ensembles de simulations issues de plusieurs modèles climatiques afin de traiter l'évolution du climat sous forme probabiliste.

Les recommandations que l'on pourrait adresser au forestier sont les suivants :

(1) **Favoriser le mélange pin/chêne.** Le taux de dépérissement des pins est plus fort quand ils sont isolés et de même celui des chênes est plus fort quand leur densité est plus forte. Un mélange équilibré est susceptible d'augmenter leur résistance. D'autre part, leur stratégie contrastée face à la sécheresse permettrait d'augmenter la résilience des écosystèmes en mélange face au changement climatique.

(2) **Eclaircir plus fortement les peuplements** afin de diminuer la compétition pour les ressources entre les individus.

(3) Lors des éclaircies, **sélectionner les individus les plus vigoureux.**

(4) **Favoriser les peuplements situés en limite altitudinale de l'aire de répartition :** le changement climatique impliquera un stress hydrique moins fort en basse montagne qu'en plaine.

3. Réalisations pratiques et valorisation :

La problématique des changements climatiques et de leur impact sur les forêts méditerranéennes implique la formation des forestiers. C'est ainsi que l'équipe participante du CEMAGREF a organisé une formation (le 15 mai 2007) pour 16 ingénieurs environnement des Centres de la propriété Forestière de toutes les régions françaises, ainsi que de représentants de la Direction de l'Environnement de l'Office National des Forêts. Il y a eu présentation des résultats de REFORME, visite de terrain (sur les placettes Sainte-Baume, sensibilisation aux symptômes des stress hydriques et du dépérissement, notamment au niveau des feuilles et branches), et animation d'un débat sur les méthodes de gestion préventive.

La rédaction de plusieurs articles de vulgarisation à l'attention des gestionnaires et du grand public en diversifiant les cibles est également une façon de faire passer les messages issus de cette recherche. Le nombre d'interventions pour le grand public a été appréciable pendant les dernières années (voir plus bas).

La dynamique instaurée autour de ce projet a permis la construction de la station de Font-Blanche qui va compléter celle de Lamanon (en particulier pour la station de mesure de flux). Elle sera valorisée par l'arrivée de financements complémentaires obtenus pour la suite de ce projet auprès de l'ANR Vulnérabilité : milieux et climats (voir plus bas)

PARTENARIATS MIS EN PLACE, PROJETS, ENVISAGES

Un projet appelé DROUGHT+ a été soumis à l'ANR Vulnérabilité, milieu et climat par S. Rambal et L. Misson (CEFE) et financé sur la période 2007-2010 à hauteur de 730 000 euros. Ce projet est la continuation naturelle du projet REFORME puisqu'il vise à mieux comprendre l'effet du stress hydrique sur la croissance du pin d'Alep et du chêne vert. Le consortium est constitué des mêmes équipes que pour REFORME.

La tour de flux de Puéchabon est intégrée au programme Carboeurope-IP. Les données de flux sont mises en ligne dans la base de données de ce projet chaque 6 mois et mises immédiatement à disposition de la communauté scientifique. La plateforme expérimentale de Puéchabon et son dispositif d'exclusion de pluie sont associés au projet IMECC: Infrastructure for Measurement of the European Carbon Cycle. Une initiative qui permet d'attirer des équipes externes pour l'optimiser l'utilisation de la plateforme. C'est une Integrated Infrastructure Initiative (I3) du 6ème PCRD. Nous sommes partenaires extérieurs au projet UE NitroEurope par: 1) la mesure continue des dépôts secs et 2) la microbiologie du sol « soil bioassay : The purpose of the simple soil bioassay is to provide best estimates of emission potentials for N2O and other greenhouse gases on L1 sites. Data from the bioassays

can then be used to assess the effects of N-input on nitrogen oxides emissions to reveal relationships between C and N fluxes and to parameterize models”.

Les stations de mesures en forêt font partie de l'ORE FORET animé par le GIP ECOFOR dont les activités concernent le fonctionnement et dynamique des écosystèmes forestiers, la gestion durable des forêts, la mobilisation de l'information forestière. Dans ce cadre le projet REFORME a été présenté à la journée d'information et de débat "la forêt face aux changements climatiques : acquis et incertitudes" (15 décembre 2006) qui a mobilisé un grand nombre de scientifiques et de gestionnaires de la forêt.

L'UR EMAX accueillera de septembre à décembre 2007 un thésard Espagnol du Departamento de Ecología, Facultad de Ciencias (Universidad de Granada). Il s'agit d'un échange sur la mesure de l'effet du changement climatique sur les organes aériens du pin d'Alep. Un travail en commun sera entrepris sur le site de Font-Blanche pour comparer puis harmoniser les protocoles. Cette coopération a débuté en mars 2006 par l'accueil d'une délégation de chercheurs Espagnols en visite sur le site.

POUR EN SAVOIR PLUS (QUELQUES REFERENCES)

- Reichtein M. et al., 2006. Reduction of ecosystem productivity and respiration during the European summer 2003 climate anomaly: a joint flux tower, remote sensing and modelling analysis. *Global Change Biology* 12: 1-18.
- Davi et al., 2006. Sensitivity of water and carbon fluxes to climate changes from 1960 to 2100 in European forest ecosystem. *Agricultural and Forest Meteorology* 141: 35-56.
- Granier A. et al., 2007 ; Evidence for soil water control on carbon and water dynamics in European forests during extremely dry year: 2003. *Agricultural and Forest Meteorology* 143: 123-145.
- Gosselin, M. & Laroussinie, O. (coordinateurs), 2004. Biodiversité et gestion forestière. Connaître pour préserver. Synthèse bibliographique. Paris, Cemagref éditions, collection Etudes du Cemagref, série gestion des territoires n°20, 320 p. + CD rom
- Curt, T., Prevosto, B. et Bergonzini, J.C., 2004. Boisements naturels des terres agricoles en déprise. Paris, Cemagref éditions, collection GIP ECOFOR "Ecosystèmes Forestiers" n°2, 119 p.
- Hanson PJ Wullschleger SD [eds.] (2003) North American Temperate Deciduous Forest Responses to Changing Precipitation Regimes. *Ecological Studies* 166. Springer, New York.

LISTE DES PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES, PARTICIPATIONS A DES COLLOQUES, THESES, ACTIONS DE VALORISATION, PARTICIPATION A DES FORMATIONS, ACTIONS MEDIATIQUES

1. Publications

PUBLIEES OU SOUS PRESSE

- Vennetier M., Thaabet A., Gadbin-Henry C., Ripert C., Prevosto B., Borgniet L., Vila B., Guibal F., Ray R., Buron V. et Zanetti C. 2007 (Accepté). *Conséquences de la canicule et de la sécheresse 2003 sur les pins méditerranéens*. In Landmann G. (ed.) "Sécheresse et canicule 2003. Contribution des dispositifs de suivi et d'observation des forêts à la quantification des effets immédiats et à court terme". ECOFOR. (in press)

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

SOUMISES

- Gaucherel, C., Campillo, F., Misson, L., Guiot, J. and Boreux, J.J., subm. Parameterization of a process-based tree-growth model: comparison of optimization, MCMC and particle filtering algorithms. *Ecological Modelling*.
- Vila Bruno, Vennetier Michel, Ripert Christian, Chandieux Olivier, Liang Er-yuan and Guibal Frédéric, (Soumis à *Annals of Forest Sciences*). *Did global change already modify trees' productivity? Consequences for species distribution in the French Mediterranean forest.*
- Vennetier Michel, Ripert Christian, Maille Eric, Blanc Laurence, Torre Frank, Taton Thierry, Brun Jean-Jacques, (soumis à *Annals of Forest Sciences*) : *A statistical water-balance model based on the flora for Mediterranean forested areas. Methodological finalization.*

EN PREPARATION

- Gaucherel, C., Guiot, J. and Misson, L., Potential distribution area of French Mediterranean forests in the 21st century. To be submitted to *Ecology and Biogeography*
- Thaabet A., Vennetier M., Gadbin-Henry C., Borgniet L., Vila B., Guibal F., (à soumettre à *Canadian Journal of Forest Research*). *Impact of scorching heat and drought on the growth and aerial morphology of Pinus halepensis.*
- Vennetier Michel, Ripert Christian, Chandieux Olivier, Rathgeber Cyrille, Brochiéro Fabien, Brun Jean-Jacques, Taton Thierry, (à soumettre à *Plant Ecology*). *Autecology of Pinus halepensis in France. The balance between global and local water balance in relation to climate change.*
- Vennetier Michel et al. (à soumettre à *Global Change Biology*). Forecasting the shift in species distribution with climate change using a water balance model at landscape level.

2. Communications à des colloques

- Castro Jorje, Vennetier Michel, *et al.* 2007 (Accepted). *Forest Dieback in Europe: Climate Drivers, Symptoms, and Physiological Processes.* Annual meeting of the Ecological Society of America (9 August 2007).
- Doussan C., Hallgren S., Huc R., Porté A. – 2005. Limitations of *Pinus halepensis* and *Quercus ilex* water use in a mixed forest: results from the model of Sperry, Adler et al. Séminaire du groupe Groupe Flux d'eau - Xylème (INRA), Clermont Ferrand.
- Gaucherel, C., Misson, L., Guiot, J., december 2005. I: Carbon Fluxes Parameterization and Modeling at Regional Scale Thanks to Dendrochronological Time Series, *Eos Trans. AGU*, 86(52), Fall Meet. Suppl., Abstract B41B-0185
- Guibal, F. : 15 ans de suivi des écosystèmes forestiers. Résultats, acquis et perspectives de RENECOFOR, Beaune, 9-11/05/2007.
- Guiot J. et Huc R. - 2005. Interactions végétation – atmosphère : mesures et modélisation des processus de croissance du pin d'Alep, Séminaire IFR 112 – IRSN, Jeudi 2 juin 2005 CEREGE, Gestion des risques et vulnérabilité des territoires.
- Guiot, J., 2005. Contrôle des reconstitutions climatiques par l'utilisation des modèles climatiques et la génération de pseudo-proxies. *Variations Hydro-Climatiques: reconstitutions et prévisions*, Boreux et al. (eds), Université de Liège, Arlon, 19-20 oct 2005, p. 29-30.
- Joffre R. Rocheteau A. Rambal S. Ourcival JM. Effects of experimental drought on soil CO₂ efflux in a Mediterranean *Quercus ilex* coppice. The vulnerability of Mediterranean

Terrestrial Ecosystems to Climate Change. Consiglio Nazionale delle Ricerche, Roma, Italy, 26-28 April 2006 (poster).

- Mouillot F. Ratte JP Rambal S. & Joffre R. Vulnerability assessment of Mediterranean landscapes to drought: Confronting simulated site water balance and remotely sensed data. The vulnerability of Mediterranean Terrestrial Ecosystems to Climate Change. Consiglio Nazionale delle Ricerche, Roma, Italy, 26-28 April 2006 (communication orale).
- Rambal S. Rodriguez R Rocheteau A. Experimental drought led to intricate functional changes in the evergreen Mediterranean oak *Quercus ilex*. The vulnerability of Mediterranean Terrestrial Ecosystems to Climate Change. Consiglio Nazionale delle Ricerche, Roma, Italy, 26-28 April 2006 (communication orale).
- Rambal, S. et R. Joffre, Régionalisation des impacts pour la forêt méditerranéenne. Séminaire « La forêt face aux changements climatiques, Acquis et incertitudes », ECOFOR, Paris, 15 décembre 2005
- Rambal S. Rodriguez R. Ourcival JM & Joffre R. Does *Quercus ilex* canopy under experimental drought validate the ecohydrological equilibrium hypothesis? The vulnerability of Mediterranean Terrestrial Ecosystems to Climate Change. Consiglio Nazionale delle Ricerche, Roma, Italy, 26-28 April 2006 (communication orale).
- Thabeet Ali, Gadbin-Henry Claude, Denelle Nicole, Vennetier Michel, Borgniet Laurent, Lamar (De) A. - 2007. *2003 scorching heat and Scots pine (Pinus sylvestris L.) in a French Mediterranean forest*. Actes des Rencontres Méditerranéennes d'Ecologie, Béjaïa (Algérie), 7 au 9 novembre 2006. 10p Sous-presse.
- Vennetier M. , Vila B., Liang E.Y., Guibal F., Thaabet A., Gadbin-Henry C., Ripert C., Chandiooux O. 2007 (Accepté): Conséquences du changement climatique et de la canicule 2003 sur la limite pin sylvestre / pin d'Alep en région méditerranéenne. [en ligne] Symposcience. Actes du Colloque : "La forêt face aux changements climatiques : acquis et incertitudes" Paris, 13-15 décembre 2005. ECOFOR." (Publication = mise en ligne prévue fin 2007)
- Vennetier M., Vila B., Liang E.Y. 2006. *Impact du changement global et climatique sur la productivité forestière et les limites bioclimatiques*. Séminaire régional « Impact du changement climatique sur l'agriculture et la forêt ». Avignon 2 février 2006. INRA.
- Vennetier M., Vila B., Liang E.Y., Guibal F. 2007 (Accepté): *Climate change impact on Mediterranean pines*. *Options Méditerranéennes*, CIHEAM, Proceedings of the International Conference on Conservation, Regeneration and Restoration of Mediterranean Pines and their Ecosystem (MEDPINE3), Bari (Italy), September 25-30 , 2005 Università della Basilicata, Mediterranean Agronomic Institute of Bari (MAIB).

3. Thèses soutenues ou en cours

- Thabeet Ali : Impact de la canicule 2003 sur la croissance et l'état sanitaire de la forêt méditerranéenne. (Soutenance prévue début 2008), codirection M. Vennetier
- Sandrine Chauchard, « Structure et dynamique d'une forêt méditerranéenne dans un monde changeant », Université Montpellier II. (soutenance novembre 2007), co-direction F. Guibal.

4. Articles techniques et de vulgarisation

- Guiot, J., 2006. Les changements climatiques : que nous apprend le passé, Biofutur, 270, octobre 2006, 18-21.
- Vennetier M. Vila B., Liang E.Y., Guibal F., Ripert C., Chandiooux O. - 2007 (Accepté). 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 (Revue Technique de l'Office National de forêts), numéro spécial "changements climatiques, Printemps 2007. (Sous presse)

- Vennetier M., Vila B., Liang E., Guibal F., Ripert C., Chandioix O., 2006. Les changements climatiques modifient l'équilibre pin sylvestre / pin d'Alep. *Forêt entreprise* (revue technique de la forêt privée française), 169 : 47-51.
- Vennetier Michel - 2006. Quand les arbres disent le temps. *Atmosphériques* (revue Météo-France) Déc. 2006; 3p
- Berges, L., Vennetier, M. - 2006. Le climat a-t-il un impact sur la croissance des arbres ? *Espaces Naturels* (revue technique du ministère de l'Environnement), n° 13, p. 5 – 6
- Vennetier Michel – 2005 : *Changement climatique et forêt méditerranéenne. Info DFCI* (revue technique des réseaux Incendies de forêt), n° 55, p.1-3
- Vennetier M., 2006. Impact du changement climatique sur les forêts de la Sainte Baume. *Pays Sainte Baume*, n° 18, p. 16-17
- Vennetier Michel – 2005 : *Changement climatique et forêt méditerranéenne*. Bulletin de l'AIFM (Association Internationale Forêt Méditerranéenne), n° 16, p. 4-5
- Rambal, S., 2006. Journal du CNRS, n°198-199, juillet août 2006, p. 8-9. Journal d'une forêt de laboratoire ou <http://www2.cnrs.fr/presse/journal/2983.htm>

4. Conférences grand public

- J. Guiot : changements climatiques et végétation : ce que nous apprend le passé, conférence des « Jueidis du CNRS », 26 octobre 2006, Délégation régionale 12 du CNRS, Marseille
- S. Rambal : Maison de l'environnement de l'Hérault, Prades le Lez, conférence grand public 27 avril 18h « Les écosystèmes méditerranéens en danger ? »
- S. Rambal : Journée Ecologie, Environnement et Développement durable (EEDD), IUFM, Montpellier, 23 mai 2007 « Changements climatiques et EEDD : le fossé global/local »
- F. Guibal : Participation à la *Fête de la Science 2006*, Village des Sciences, Europôle de l'Arbois, Aix-en-Provence, 9-15/10/2006 : « Dendrochronologie du domaine méditerranéen ».

5. Communications dans les médias

MICHEL VENNETIER

- - Reportage au 20h de TF1 le 26 août 2006 : 1/2 journée de tournage le 23 août.
- - Reportage au 20h de Antenne 2 le 1^{er} sept 2006 : 1 journée de tournage le 30 août.
- - Emission en direct pour France-Bleue Provence, 1/2h le 27 mai 2006
- - Emission programmée en direct pour France-Culture le 16 juillet 2007 de 14H à 15H.
- - 2 longs articles dans le journal La Provence en 2006.

SERGE RAMBAL

- Radio France Internationale, émission Le Monde Change, diffusée le 18 septembre 2006. Interviews de Richard Joffre et de Serge Rambal. Durée 19'30.
- TF 1 - Journal de 20h, 16 août 2006, durée 2 min.
- France 2 - Journal de 20h, 29 août 2006, durée 2 min.
- M6 - 6 Minutes, édition de Montpellier, 6 septembre 2006, durée 1 min.
- FR3 - Midi Pile, édition France3 Sud, 12 septembre 2006.
- Chaîne parlementaire Public Sénat Emission Paroles de Sciences, 10 mai 18h45, durée 3 min.
- L'Hérault du jour, 11 ai 2007. pp. 3, Réchauffement en flèche de l'arc méditerranéen.
- VSD, 11-17 octobre 2006, p. 72-74 Au cœur d'une forêt laboratoire
- Midi Libre, 30 août 2006 La forêt résiste, le buis jaunit.

- Midi Libre, 31 août 2006 La sécheresse plombe l'avenir des pins du Midi.

6. Site Web

Le Groupement d'Intérêt Public Médias-France a pour charge de constituer et de gérer le site Internet du projet. Médias-France a donc constitué la maquette du site Internet présentant le projet Reforme.

Ce projet de site se trouve à l'adresse : <http://medias.cnrs.fr/reforme>

Sur ce site sont répertoriées les rubriques suivantes :

1. Le projet, avec :

1.1 Le résumé

1.2 Les données sur les sites équipés (Puéchabon, Lamanon et Fonds-Blanche), les mesures intensives effectuées (LAI, RAI, flux de sève, biomasse, croissance en continu du tronc, profil densitométrique, lumen, dimension des cellules, contenu en eau du sol, quantité d'eau qui arrive au sol, évaporation du sol, transpiration du sous-bois), les données dendrochronologiques, les simulations climatiques et les bases de données (Format, Dendrodb, Modis, ...)

1.3 La méthodologie avec les modèles écophysologiques (Maiden, Sierra, Bilhy), les scénarios pour le 21^{ème} siècle et la sensibilité du pin d'Alep

2. les évènements marquants (colloques, ateliers, ...)

3. les références bibliographiques et les documents en téléchargement (UNFCCC, protocole de Kyoto, ...)

4. la liste des partenaires du projet et leurs coordonnées,

5. un domaine restreint aux partenaires, pour la mise en commun de documents

6. une liste des acronymes utilisés

RESUME

Les forêts méditerranéennes sont cruciales pour préserver la biodiversité élevée qui les caractérisent et pour fournir des services écosystémiques essentiels, tels que la protection des sols, la conservation des ressources en eau et la régulation du climat. Les modèles climatiques simulent, pour le 21^e siècle, un réchauffement significatif et une décroissance des précipitations, avec une augmentation significative des événements extrêmes, qui peuvent réduire considérablement la productivité de ces forêts. Quantifier ces impacts pour aider le gestionnaire à prendre les décisions adéquates était l'objectif principal de REFORME. Pour l'atteindre, nous avons adopté une stratégie basée sur des mesures en station expérimentale forestière (Puéchabon, Lamanon), des données dendrochronologiques à large échelle spatio-temporelle et une hiérarchie de modèles de végétation (MAIDEN, SIERRA, MODIS/GPP, BILHY). Les études de vulnérabilité ont été basées sur le scénario B2 (relativement modéré) du modèle ARPEGE de Météo-France. Les principaux résultats obtenus sont les suivants :

C'est la variabilité du climat des mois d'avril à juin qui dicte la variabilité de l'accroissement radial du chêne vert et celle des flux de carbone. Il y a là une très bonne convergence des mesures des flux et de la dendrochronologie. A une échelle plus large, on a montré que les images satellitaires telles qu'elles sont fournies par MODIS est un bon outil pour estimer la productivité des forêts méditerranéennes, mais il doit être corrigé de certains biais systématiques. Puéchabon a subi en 2005 une attaque de chenilles qui a eu plus d'effets que de successives sécheresses sur la vulnérabilité du chêne. C'est un phénomène à prendre en compte dans les études de vulnérabilité au changement climatique, car l'augmentation de la température de printemps risque d'entraîner un accroissement de la fréquence de telles attaques dans le futur.

Pour le pin d'Alep, la canicule 2003 est également un bon modèle pour l'impact du réchauffement climatique. Il y a eu une réduction de 30 à 60% de la taille des aiguilles, du nombre d'aiguille formées, de la longueur des pousses annuelles sur les rameaux et de la fructification. Le polycyclisme a disparu presque entièrement après 3 années de sécheresse. Le modèle BILHY a montré, en termes de production de bois, une perte d'environ 28% pour Font-Blanche, et pour Lamanon une perte de 30%.

La comparaison des simulations par MAIDEN entre le chêne et le pin d'Alep a montré que les deux espèces arrivent à un maximum de croissance durant la première décennie du 21^e siècle, avec une productivité trois fois plus forte pour le pin d'Alep. Ensuite, la sécheresse s'accroissant, les espèces voient leur productivité diminuer jusqu'à la fin du 21^e siècle, de 28% pour le chêne et 8% pour le pin (moins fortement qu'avec BILHY), qui semble donc devoir résister mieux au stress hydrique. Si on prend en compte l'effet de fertilisation, les deux espèces semblent résister beaucoup mieux (avec une productivité légèrement accrue). Une approche statistique menée en parallèle a montré l'importance de l'effet différé des extrêmes des années précédentes, capables, par leur atteinte à l'état sanitaire de l'arbre et par la défoliation occasionnée, de se cumuler exponentiellement avec plusieurs événements successifs. Cet effet différé a donc la potentialité d'atténuer fortement l'effet de fertilisation. Enfin le pin d'Alep, sans doute par sa capacité à fermer plus précocement ses stomates, semble mieux à même de résister que le chêne vert.

Nos résultats ont des limites liées à la fois aux données et aux modèles. Nos mesures ne couvrent pas encore des périodes de temps optimales. Les modèles de végétation ont encore beaucoup de lacunes qu'il conviendra de combler progressivement dans le futur. Enfin, nos

études de vulnérabilité sont basées sur un seul scénario (B2) d'un seul modèle climatique. Elles n'ont donc pas de valeur de prévision mais simplement une valeur d'indication. Il sera nécessaire, pour compléter cette approche, d'utiliser des ensembles de simulations issues de plusieurs modèles climatiques afin de traiter l'évolution du climat sous forme probabiliste.

MOTS CLES

FORÊTS MEDITERANÉENNES, VULNERABILITE AU CHANGEMENT CLIMATIQUE, SECEHERESSES, CROISSANCE DES ARBRES, FLUX CO₂, FERTILISATION, EVENEMENTS EXTREMES, CHENE VERT, PIN D'ALEP

ABSTRACT

The Mediterranean forests are critical to preserve the high biodiversity which characterizes them and to provide essential ecosystem services, such as soil protection, water resources conservation and climate regulation. The climatic models simulate, for the 21th century in that region, a significant warming and a reduction of rainfall, with a significant increase of extreme events, which can considerably reduce the forest productivity. Quantification of these impacts to help the forest manager to take appropriate decisions was the main objective of REFORME. To reach it, we adopted a strategy based on measurements in forest experimental station (Puéchabon, Lamanon), of tree-ring data at broad spatio-temporal scale and a hierarchy of vegetation models (MAIDEN, SIERRA, MODIS/GPP, BILHY). The vulnerability studies have been based on the B2 scenario (comparatively moderate) by the model ARPEGE of Météo-France. Main acquired results are the following:

The climate variability from April to June drives the variability of the radial tree-ring increment of the evergreen oak and of the fluxes of carbon. There is a very good convergence between flux measurements and dendrochronology. At a broader scale, we showed that remote sensing images such as they are provided by MODIS is a good tool to estimate the productivity of the Mediterranean forests, but it must be corrected for some systematic biases. Puéchabon was subjected in 2005 to a caterpillar attack with more effects than successive droughts on the vulnerability of the oak. This phenomenon must be taken into account in vulnerability studies to climatic change, because the increase of the spring temperature risks to induce a decrease of the return period in future.

For the Aleppo pine, the heat wave of 2003 is also a good model for the impact of climatic warming. There was a reduction from 30 to 60 % of the size of needles, of the number of the needles formed, of the length of the annual shoot on branches and fructification. The polycyclism disappeared almost entirely after 3 years of drought. The model BILHY showed a loss, in terms of wood production, about 28 % for Font-Blanche, and for Lamanon a 30 % loss.

The comparison of MAIDEN simulations between the oak and the pine showed that both species arrive at a maximum of growth during the first decade of the 21th century, with a three times stronger productivity for the Alep pine. Then, drought becoming more important, the species see their productivity diminishing till the end of the 21th century, of 28 % for the oak and 8 % for the pine (smaller values than with BILHY). The latter therefore seems to resist better to water stress. If we take into account the fertilisation effect by CO₂, both species seem to resist much better (with a productivity slightly increased). A statistical approach conducted in parallel showed the importance of the delayed effect of the extremes of the previous years. The latter are able, by degrading the health state of the tree and by subsequent

defoliation, to exponentially cumulate with several successive events. This delayed effect has therefore the potentiality to attenuate the fertilisation effect. Finally Aleppo pine, likely by its capacity to early close its stomatae, seems to better resist than evergreen oak.

Our results have limitations linked together to data and to models. Our measurements still do not cover optimum periods of time. The vegetation models have some more lacunae which must be filled up progressively in future. Finally, our vulnerability studies are based on a single scenario (IPCC-B2) of a single climatic model. They therefore do not have value of prediction but simply of indication. It will be necessary, to complete this approach, to use simulation ensembles from several climate models to deal with the climate evolution under probabilistic forms.

KEY WORDS

MEDITERRANEAN FORESTS, VULNERABILITY TO CLMATIC CHANGE, DROUGHTS, TREE-GROWTH, CO₂ FLUX, FERTILISATION, EXTREME EVENTS, EVERGREEN OAK, ALEPPO PINE

