

Observer et s'adapter au changement climatique en forêt méditerranéenne



Actes du colloque

30 novembre - 3 décembre 2010

Marseille et Alpes-Maritimes

- Réalité et perception du changement climatique
- Intégrer sciences et sociétés
- Scientifiques et gestionnaires répondent
à quatre grandes questions
- Transfert et communication des connaissances

Numéro spécial "Observer et s'adapter au changement climatique en forêt méditerranéenne"

sommaire

Denis CHEISSOUX

Editorial

p. 92

Réalité et perception du changement climatique

Gilles BONIN

Synthèse des acquis du colloque "Changements climatiques
et forêt méditerranéenne" de 2007

p. 93

Bernard SEGUIN

Après le colloque de 2007... Quelle réalité et quelle perception
du changement climatique ?

p. 97

Pierre BOUILLON

Les impacts du changement climatique et l'adaptation des espaces forestiers :
coûts des impacts et mesures d'adaptation en métropole

p. 101

Jean-Marie RAME, Christelle DEBLAIS et André GORLIER

La forêt dans le Plan Climat du Pays d'Aubagne et de l'Etoile :
de la stratégie à la mise en œuvre

p. 111

Intégrer sciences et société pour une meilleure évaluation des enjeux liés au changement climatique

Daniel MATHIEU

Observer la nature, une problématique « science citoyenne » ?

p. 115

Scientifiques, gestionnaires et décideurs répondent à quatre grandes questions

*Les systèmes d'observation : comment mieux estimer
les effets du changement climatique pour mieux gérer ?*

Bernard BOUTTE

Les réseaux d'observation du Département de la Santé des forêts

p. 119

Thierry GAUQUELIN, Michel BOER, Virginie BALDY, Catherine FERNANDEZ, Nicolas MONTES,
Mathieu SANTONJA, Jean-Philippe ORTS, Ilja REITER

L'O3HP (Oak Observatory at OHP) : un site expérimental pour l'étude
du fonctionnement et de la biodiversité de la Chênaie pubescente
face aux changements climatiques

p. 127

Guillaume SIMIONI et Roland HUC
Le site d'étude à long terme de Fontblanche
p. 133

Guy MARECHAL et Jean LADIER
Veille sanitaire et dépérissement forestier dans le département
des Alpes-Maritimes
p. 135

Comment conserver espèces et espaces dans un contexte changeant ?

Michel VENNETIER et Christian RIPERT
Flore méditerranéenne et changement climatique : la course-poursuite est engagée
(résumé)
p. 141

Vincent BADEAU
Les résultats des projets CARBOFOR et ANR-QDiv :
les questions qu'ils soulèvent - Les avancées apportées par le projet ANR-Climator
p. 143

Favoriser l'adaptation ou créer résolument une nouvelle forêt ?

Michel VENNETIER, François GIRARD, Cody DIDIER, Samira OUARMIM, Christian RIPERT,
Laurent MISSON, Roland ESTEVE, Willy MARTIN, Aminata NDYAYE
Adaptation phénologique du pin d'Alep au changement climatique
p. 151

Roland HUC
Les réponses des arbres aux contraintes climatiques : aspects écophysologiques
p. 167

Bruno FADY
Les changements climatiques et leurs effets sur la forêt méditerranéenne :
aspects génétiques
p. 173

Myriam LEGAY
Les grandes orientations d'adaptation au changement climatique : point d'étape
p. 179

Bernard PREVOSTO et Christian RIPERT
Les forêts mélangées en région méditerranéenne :
quels bénéfices et comment créer le mélange ?
p. 187

Cecile MARIS
Changements climatiques et gestion forestière en Aquitaine - Interrogations
et recherches de réponses concrètes via le programme d'expérimentation Climaq
p. 197

Face à un risque d'incendie accru, quelles évolutions envisager pour la défense des forêts contre l'incendie ?

Julien LEMOND, Christian PAGE et Michel DEQUE
Le climat futur des régions méditerranéennes françaises : quelles tendances ?
p. 205

Eric RIGOLOT
Evolution des surfaces incendiées en fonction des changements météorologiques
p. 213

Yvon DUCHÉ, Rémi SAVAZZI, Loïc COMMAGNAC, Emmanuel CLOPPET
et Mathieu REGIMBEAU
Essai de cartographie des massifs potentiellement sensibles aux incendies estivaux
à l'horizon 2040
p. 217

Jean LABADIE et Stéphane FARCY
Comment une collectivité et les services de lutte s'organisent-ils face
à une augmentation des risques incendies ? L'exemple du département du Var
p. 225

Les méthodes de transfert et de communication des connaissances

Pierre CLEMENT
Didactique des sciences et éducation au développement durable :
processus et enjeux
p. 229

Céline PERRIER
Le réseau mixte technologique AFORCE : un outil au service du transfert
p. 241

Christian SALVIGNOL
Exemple de méthode de transfert et de communication des connaissances
Des recommandations jusqu'à leur mise en œuvre concrète.
La certification européenne des compétences des entrepreneurs
de travaux forestiers
p. 245

Tournées forestières

Rémi VEYRAND
Visite du site pilote de la forêt domaniale de Nans (Alpes-Maritimes),
présentée dans le cadre du projet européen For Climadapt
p. 249

Paul SANSOT
Visite du site d'expérimentation sur les effets du changement climatique
de Saint-Michel-l'Observatoire (O3HP)
p. 253

Liste des participants
p. 257

éditorial

Attendre la prochaine glaciation ? Face au réchauffement de la planète, les positions du public sur la question ont beaucoup évolué ces dernières années et, notamment, depuis l'organisation en 2007 du premier colloque de l'association Forêt Méditerranéenne.

En effet, d'un esprit de consensus sur le constat de l'évolution climatique, nous sommes passés à une remise en question, favorisée d'une part par des années pluvieuses, mais aussi et surtout, par des polémiques médiatiques. Si l'Académie des Sciences a bien « remis les pendules à l'heure » en réaffirmant la réalité du changement climatique, le doute subsiste pour certains.

Mais pas pour tout le monde. L'intérêt que portent les assureurs et les pétroliers à la question est, sans doute, à lui seul, une preuve que le climat va évoluer avec des conséquences indéniables sur la Planète !

Pour les forestiers également, le doute n'est pas permis et, avec les gestionnaires de l'eau, ce sont ceux qui se préoccupent le plus du long terme. C'est cette position que je trouve formidable qui m'a poussé à accepter d'animer ce 2^e colloque de l'association, en tant que journaliste responsable d'un magazine Nature et Environnement.

Aujourd'hui, il n'est plus possible de faire comme avant, même si cela serait tellement plus confortable. Nous sommes tous co-gestionnaires du climat. Nous ne pouvons pas nous permettre d'attendre la prochaine glaciation. Nous devons nous poser la question de « comment faire avec notre Planète ? » et comment anticiper les effets du changement climatique. L'atténuation ne sera pas possible mais l'adaptation sûrement. Nous changeons de civilisation.

Le défi est intéressant, les forestiers l'ont relevé.

Denis CHEISSOUX

Journaliste, animateur de "CO2 Mon amour" sur France Inter

Les journées "Observer et s'adapter au changement climatique en forêt méditerranéenne" ont été organisées du 30 novembre au 3 décembre 2010 par l'association Forêt Méditerranéenne, à l'Hôtel de Région à Marseille et dans les Alpes-Maritimes, avec l'appui financier de :



Synthèse des acquis du colloque " Changements climatiques et forêt méditerranéenne " de 2007

par Gilles BONIN

En novembre 2007, notre Association organisait un colloque original associant effets du changement climatique et forêts méditerranéennes. Cette manifestation connut un grand succès, attirant plus de 400 participants de toutes catégories professionnelles et d'origines géographiques variées, justifiant ainsi la décision de recommencer l'expérience en 2010, pour faire un point sur l'évolution des connaissances théoriques et pratiques. L'auteur rappelle ici brièvement les principales idées développées en 2007.

L'importance des forêts en région méditerranéenne française justifiait les questions que l'on pouvait se poser dans un scénario de changement climatique.

Valérie Jacq, climatologue, a fait le point sur le changement climatique à l'échelle planétaire après le quatrième rapport du GIEC : accroissement des températures moyennes mondiales de l'atmosphère et de l'océan, fonte généralisée des neiges, élévation du niveau des mers. Mais l'aspect le plus intéressant pour les forêts méditerranéennes est l'apport de prévisions sur le climat des régions méditerranéennes. Elle a présenté un graphique très démonstratif sur l'évolution de la température moyenne annuelle à Marseille depuis 1880. V. Jacq a expliqué la démarche de modélisation à l'échelle régionale. Le but de cette démarche est de mettre en évidence des phénomènes régionaux non perceptibles à l'échelle globale. Plusieurs modèles sont utilisés qu'il n'est pas nécessaire de rappeler ici. Le bassin méditerranéen est, du point de vue du climatologue, un bon objet d'étude, parce qu'il est bien délimité par des reliefs. Les résultats obtenus avec ces modèles sont en accord avec les perspectives globales : forte augmentation des températures moyennes annuelles, mais avec un réchauffement maximal en été (et principalement sur les températures maximales), diminution des précipitations moyennes annuelles mais surtout diminution des pluies estivales. Ceci se traduira dans nos régions par :

- une saison sèche accentuée, donc un stress hydrique accru, ce qui augmente le degré de « méditerranéité bioclimatique » ;
- des risques de sécheresses prolongées, ce qui entraînera une dérive vers les étages bioclimatiques plus arides, ceci avec des événements climatiques plus brutaux et plus fréquents.

Pascal Acot, historien, aborde ensuite le changement climatique sous l'angle de la perception du phénomène par les populations et sous l'angle socio-économique. Il rappelle, à juste titre que les perspectives des scientifiques concernant le climat, avant les années 1990, étaient un refroidissement général. C'est donc avec surprise que l'on perçoit ce phénomène inverse, rapide et sans équivoque. P. Acot rappelle quelques apports scientifiques déjà anciens qui viennent éclairer la situation climatique actuelle. Il évoque aussi, la longue histoire (depuis Platon) des préoccupations de l'Homme méditerranéen face à la sécheresse, des interrogations et des risques au plan socio-économique.

Jacques Blondel fait la transition entre les interventions précédentes sur le changement climatique et la description des conséquences sur les systèmes naturels et leurs composants biologiques. Il souligne l'importance de l'action capitale de l'Homme dans un changement global dont l'aspect climatique n'est qu'un des paramètres. Il rappelle les principales composantes des changements globaux :

- destruction ou transformation des espaces naturels ;
- généralisation de l'utilisation d'intrants chimiques ;
- invasions biologiques ;
- surexploitation des ressources naturelles.

Il relie, bien évidemment, changements globaux et dérèglements climatiques en s'appuyant sur le rapport du GIEC de 2007.

Il associe ces changements globaux à l'érosion de la biodiversité et à ses conséquences rappelant l'hypothèse de VITOUSEK (1997) selon laquelle 50% des espèces de la planète pourraient disparaître dans les cinquante années à venir. Il brosse ainsi un tableau plutôt sombre, insistant sur l'inertie du système et ses conséquences sur le long terme.

Si ce changement global a entraîné au nord de la Méditerranée une progression notoire de la forêt au cours des dernières décennies, surtout du fait de l'abandon des terres agricoles, il pourra, avec les conditions climatiques annoncées, remettre en cause l'existence même de ces espaces forestiers sous leur forme actuelle.

Les effets de ces dérèglements climatiques ont déjà mobilisé les observateurs depuis la décennie 90 au niveau des écosystèmes, qu'ils soient cultivés ou naturels, comme au

niveau des réactions des populations animales et végétales. Les communications présentées en 2007 abordaient les deux types d'approches des chercheurs.

L'augmentation du gaz carbonique atmosphérique (doublement prévu pour la fin de ce siècle) entraînera un accroissement de l'activité photosynthétique comme le souligne Bernard Seguin. Cet effet sera combiné à d'autres effets du changement climatique : augmentation des températures et déficit hydrique principalement. On peut envisager, globalement, une production végétale plus importante mais avec des aspects variés en fonction du type de couvert, des conditions climatiques locales, et des conditions culturelles pour les systèmes cultivés. Le programme européen CLIVARA annonce une augmentation de la productivité potentielle des cultures. Mais l'influence d'un stress hydrique accru, surtout dans les pays méditerranéens, peut convertir l'effet potentiel positif en effet négatif. Mais l'un des effets déjà constaté est l'avancée des stades physiologiques (floraison des arbres fruitiers par exemple ou dates des vendanges) dont les conséquences peuvent être variables selon les espèces et les territoires. Au niveau des écosystèmes forestiers, l'augmentation de production moyenne est de l'ordre de 30 à 40% depuis le milieu du XX^e siècle, ce qui est justifié par l'augmentation de CO₂ atmosphérique, mais aussi (selon l'INRA de Nancy) par une fertilisation par l'azote contenue dans les eaux de pluie. Cette modification de saisonnalité entraînera parallèlement des modifications sur les cycles de vie des insectes et des maladies.

Le suivi du pin d'Alep et du pin sylvestre à la Sainte-Baume par Michel Vennetier et Bruno Vila montre que l'augmentation de croissance n'est pas la même entre ces deux espèces et que leurs perspectives d'avenir diffèrent. Pour *Pinus sylvestris* le patron de réponse est complexe et varie avec l'altitude. Cette comparaison entre deux pins très représentatifs des forêts méditerranéennes, face au changement climatique, laisse entrevoir, selon l'importance de l'augmentation des températures et du stress hydrique, une réorganisation importante de la couverture forestière.

Les contraintes climatiques évoquées — et tout particulièrement l'augmentation des températures — vont donc influencer la répartition géographique des espèces. Par

exemple, certains papillons ont vu leur aire de répartition progresser vers le nord de 200 kms en 40 ans. On peut signaler aussi, le cas de la processionnaire du pin qui progresse en latitude et en altitude.

Le phénomène climatique en cours est donc favorable aux invasions biologiques comme l'indique Frédéric Médail. Ceci aura certainement des conséquences dans les équilibres interspécifiques au sein des écosystèmes. En situation préforestière, la progression de certaines essences comme *Ailanthus altissima* ou *Robinia pseudo-acacia* devrait être spectaculaire. Le cèdre devrait voir son extension s'accroître dans tout l'étage supra-méditerranéen. Chez les feuillus, la naturalisation sera aussi de mise, en particulier dans les ripisylves. Mais la modélisation biogéographique sous contrainte du changement climatique reste incertaine car il est ardu d'intégrer les caractéristiques biologiques et les interactions biotiques dans un contexte changeant.

Toutes les essences forestières, comme les espèces animales, ne réagissent pas de la même manière à l'augmentation de température ou au stress hydrique estival, comme nous l'avons déjà vu. Ceci va modifier considérablement la relation entre végétaux et les relations hôte-parasite et plante-insecte durant les prochaines décennies.

Jean-Noël Candau a évoqué le cas des insectes ravageurs des forêts méditerranéennes. L'augmentation de température est plus efficace sur le cycle de vie des insectes des régions froides que dans les régions chaudes mais de manière générale, on assistera à une croissance plus rapide, une meilleure survie, une fécondité plus importante. L'augmentation de la vitesse de développement sera corrélée à l'augmentation de température. On a déjà pu constater chez un défoliateur, le passage d'un cycle pluriannuel à un cycle annuel. Chez les espèces à plusieurs générations (plurivoltines), l'accélération du développement pourra se traduire par l'apparition de générations supplémentaires. On assistera à une dynamique populationnelle plus efficace avec des augmentations exponentielles d'effectifs. Les effets directs seront cependant modulés par les interactions avec d'autres espèces. Les relations plantes-insectes pourront s'en trouver modifiées. Ainsi, on pourra voir s'établir une asynchronie entre le ravageur et son hôte. C'est déjà le cas, par exemple de la tordeuse

grise du mélèze, dont les populations sont en chute depuis 1989 suite à une asynchronie avec l'hôte. Les relations plante-insecte pourront être affectées par l'augmentation du CO₂ atmosphérique. Les relations entre insectes et parasites subiront aussi des évolutions avec le changement climatique et par les événements extrêmes.

On assistera aussi à une migration des aires de distribution géographique mais aussi à quelques extinctions. En 2007, de nombreux exemples de ces différents scénarios pouvaient déjà être évoqués.

Ces modifications multiples vont avoir pour conséquence une transformation des systèmes naturels et de nouvelles répartitions géographiques des écosystèmes. Il convient de rapprocher à ce sujet les communications de Jacques-Louis De Beaulieu et Valérie Andrieu-Ponel et de François Lefèvre. Les premiers nommés, paléo-écologues, évoquent les périodes du Tardiglaciaire et de l'Holocène. L'étude des végétations de ces périodes met en évidence une grande diversité de réponses aux changements climatiques. Le rôle de refuge tenu par les péninsules méditerranéennes (Espagne, Italie, Grèce-Balkans) pendant les périodes froides, pour les taxons médio-européens, puis les recolonisations des zones médio-européennes au cours des réchauffements peut être assimilé, dans une certaine mesure au scénario évoqué par François Lefèvre dans les changements de paysages annoncés. On doit assister à une dérive bioclimatique qui peut se traduire par une remontée altitudinale des étages de végétation connus et au niveau de l'étage méditerranéen, à une translation vers le nord des étages bioclimatiques les plus chauds. Compte tenu de la rapidité du phénomène (XXI^e siècle), on ne peut prévoir comment ces transferts vont se faire et avec quelles conséquences sur la biodiversité et les paysages.

Au niveau des écosystèmes forestiers, les choses se compliquent encore compte tenu des interrelations connues et inconnues entre végétaux, entre végétaux et animaux. Il faut prendre en compte aussi les modifications apportées aux cycles biogéochimiques, à la vitesse de régénération des peuplements et à leur développement. L'harmonisation actuelle des aspects fonctionnels des écosystèmes forestiers risque donc de se trouver perturbée. On voit l'urgence d'un investissement, non pas simplement pour améliorer

nos connaissances, mais pour répondre aux inquiétudes des sylviculteurs

Eric Rigolot souligne aussi l'accroissement des risques d'incendie avec la prolongation de la sécheresse estivale, dans un contexte de végétation de plus en plus thermophile.

Des effets sont signalés sur plusieurs peuplements forestiers. Quatre sites ont permis de prendre la mesure des dépérissements liés au changement climatique, deux à l'est du Rhône, deux à l'ouest.

Dans les Alpes-de-Haute-Provence, Patrick Le Meignen et Lilian Micas ont constaté des dépérissements après les fortes chaleurs de l'été 2003. Les pins sylvestres, les pins noirs, les mélèzes, les chênaies et hêtraies, ainsi que les sapinières ont été touchées. Manifestement le pin sylvestre est le plus impacté, le pin noir l'est aussi mais sur sols difficiles. Le sapin pectiné a montré quelques signes de perturbation (raccourcissement des aiguilles). Le hêtre est atteint par la pollution à l'ozone. Quant au chêne pubescent, il subit depuis 1980 un dépérissement partiel.

Cette situation considérée comme grave par les conférenciers de 2007, aura des conséquences graves puisque l'on peut s'attendre à une dégradation probable d'une partie de la couverture végétale de ce territoire avec des risques d'incendie, d'érosion, et de transformation des paysages.

Dans les Alpes-Maritimes, la situation est un peu différente. Frédéric Dentand signale des dépérissements dans les sapinières de la vallée de la Roya depuis 1990 et après 2003 dans la Vésubie et l'Audibergue où de nombreuses populations de sapins et de pins sylvestres sont touchées. L'auteur prend en compte la dimension économique du phénomène en soulignant l'apport considérable de bois sur le marché, mais aussi souligne les aspects d'une politique de lutte contre cette situation.

Des travaux de régénération ont été entrepris avec substitution des essences en place par des mélèzes, des douglas, des pins laricio, des érables sycomores. Une veille sanitaire des forêts des Alpes-Maritimes est mise en place.

Dans l'Aude, sur le plateau de Sault, la sécheresse de 2003 a entraîné un dépérissement massif de la sapinière, entraînant un changement de paysage et un effondrement du cours du bois. Face à cette situation, la solution du changement d'essence est envisa-

gée avec l'introduction du cèdre de l'Atlas ; mais aussi un changement de sylviculture du sapin est prévu.

La réserve de la forêt de la Massane, bien connue au plan naturaliste, montre aussi des dégâts. La hêtraie (située dans l'étage méso-méditerranéen) a perdu 4,5 % de ses sujets, mais c'est surtout l'aulnaie qui est très atteinte (12% de pertes surtout chez les individus âgés).

D'autres intervenants ont évoqué le cas du chêne-liège, celui du chêne vert en Espagne et même le cas du cèdre dans l'Atlas. On constate donc un panorama assez général de dépérissements, panorama qui apparaît en 2007 encore assez hétérogène, dans les observations et dans les modes opératoires.

Dans la continuité de ces exposés, Bernard Boutte posait la question : quelle gestion forestière dans la perspective du changement climatique ? Ceci lui permettait d'aborder la description du réseau des dommages forestiers.

Le réseau RENECOFOR, le programme CARBOFOR ont permis aux chercheurs et praticiens de dégager des orientations. On attend des modifications des aires climatiques potentielles des essences forestières, une perturbation des relations interspécifiques dans un contexte environnemental dérégulé. C'est pourquoi une approche multi-échelle des études est nécessaire avec un choix d'essences appropriées sur la base d'études génétiques sur les potentialités offertes par la variabilité infraspécifique. On attend aussi une révision de la typologie des stations. Les solutions de mélange d'essences dans des reboisements massifs sont souhaitées avec une sylviculture adaptée.

On voit donc que la mobilisation a été réelle comme en témoignaient les dernières communications du colloque de 2007.

Tout particulièrement, les sylviculteurs privés très inquiets depuis la canicule de 2003, s'interrogent sur les démarches à suivre, conscients que les peuplements actuels ne pourront pas résister encore 50 ans. C'est pourquoi, il est souhaité un diagnostic poussé des stations (surtout bilan hydrique) avec cartographie, une révision complète de la politique concernant le matériel végétal à renouveler (nouvelles variétés ou espèces).

G.B.

Gilles BONIN
Professeur émérite
de l'Université
de Provence
Forêt
Méditerranéenne
Mél : bonin.gilles@
wanadoo.fr

Après le colloque de 2007...

Quelle réalité et quelle perception du changement climatique ?

par Bernard SEGUIN

Lorsque nous avons organisé le colloque de 2007, les effets de plusieurs années de sécheresse étaient nettement visibles sur les peuplements forestiers. Or, aujourd'hui, la situation n'est plus la même : les effets des sécheresses ont été atténués par une année pluvieuse et les polémiques médiatiques autour de la réalité du changement climatique ont semé le doute dans les esprits. La perception politique et sociale du changement climatique a été modifiée. Bernard Seguin, responsable de la Mission « Changement climatique et effet de serre » à l'INRA et membre du GIEC, nous fait le point scientifique sur la réalité du changement climatique.

Le colloque de 2007 s'inscrivait dans un contexte post-2003 marqué par une suite d'hivers doux et la persistance de conditions estivales particulièrement chaudes et sèches, en particulier dans le sud de la France et, par ailleurs, par une reconnaissance large des travaux des climatologues avec l'attribution conjointe du prix Nobel de la paix à Al Gore et aux experts du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC). Or, le contexte, en tout cas médiatique, a incontestablement changé ces dernières années, avec l'écho plus large donné aux climato-sceptiques, s'appuyant en France et plus généralement en Europe, sur la conjonction d'épisodes hivernaux à nouveau un peu plus rigoureux ou d'un retour à des conditions de sécheresse moins extrêmes en climat méditerranéen et de la mise en évidence de quelques erreurs (par ailleurs, très minimes) dans le travail du GIEC.

Quel peut être le constat, trois ans plus tard ?

Tout d'abord (Cf. Fig. 1), sur le plan de la réalité du changement observé, il faut rappeler avec force que seul le constat au niveau global et sur une longue période peut faire foi, compte-tenu de la forte variabi-

Le réchauffement à l'échelle globale...

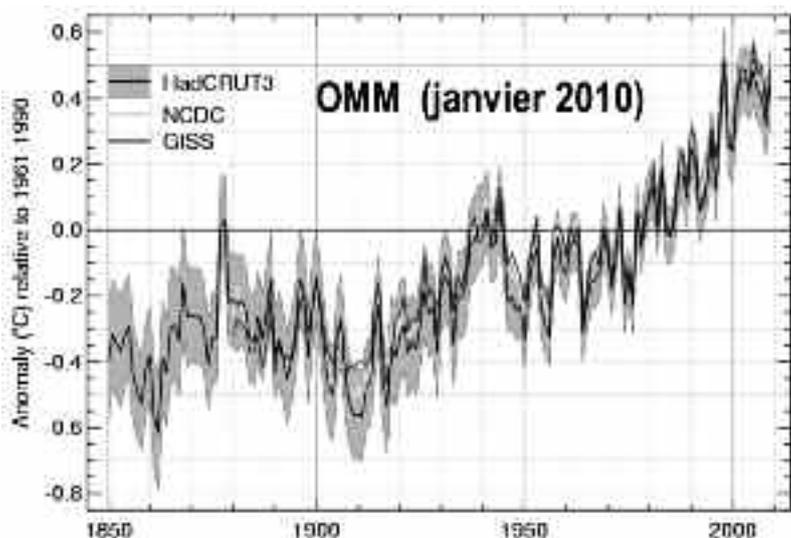


Fig. 1

... et à l'échelle de la France

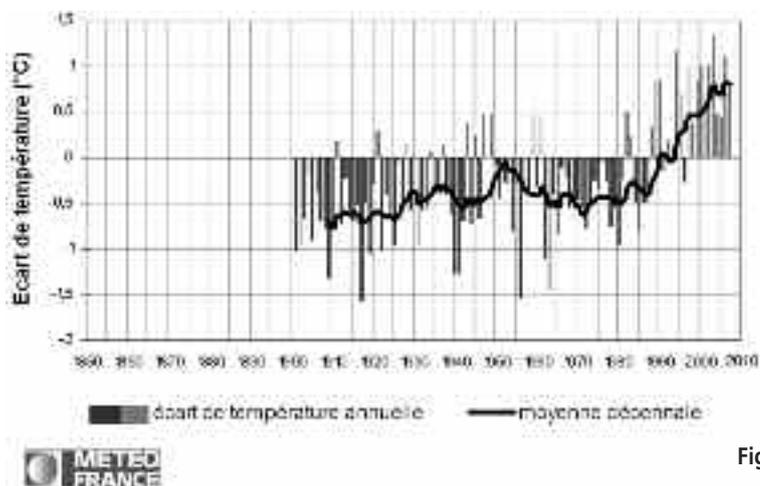
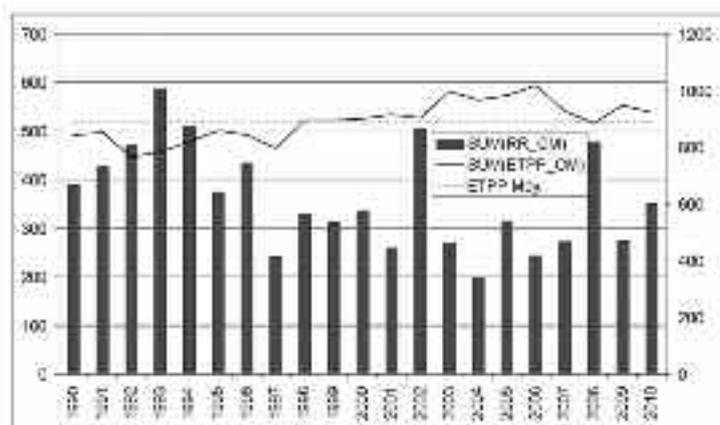


Fig. 2

Des années sèches dans le sud de la France



B. Seccombe
Agroclim
Fig. 3

lité à la fois spatiale et temporelle qui caractérise le climat et le caractérisera encore dans le futur. Les exemples abondent, et pour n'en prendre que quelques-uns proches de notre perception : l'été 2003 a particulièrement marqué notre vécu climatique, en France en particulier, et pour partie l'Europe de l'ouest, mais a très peu affecté celle de l'Est, qui a elle vécu un quasi-équivalent au cours de l'été 2007, lui-même assez frais dans le nord de l'hexagone. Dans un autre registre, si l'hiver dernier a été assez froid (mais quand même beaucoup moins que les hivers rigoureux d'antan), n'oublions pas le terrible été 2010 qu'a connu la Russie, associant canicule, sécheresse et incendies de forêt, comme l'Australie en 2008. Au final, le bilan à l'échelle planétaire gommant ces variabilités conduit à un signal qui garde, bon an, mal an, une même tendance au réchauffement, comme on peut le voir sur le site de la très officielle Organisation météorologique mondiale (OMM), à partir des données fournies par les trois organisations en mesure d'effectuer ce bilan. On peut d'ailleurs ajouter, quelques mois plus tard, que l'année 2010 s'est inscrite tout à fait dans cette tendance de fond, en se classant parmi les trois années les plus chaudes avec 1998 et 2005. Par ailleurs, l'information fournie par la répartition géographique du réchauffement est tout à fait significative : de façon constante, il est plus élevé dans l'hémisphère Nord, et surtout notablement plus fort aux fortes latitudes, comme l'attestent par ailleurs les observations de plus en plus nombreuses et précises sur le recul de la banquise polaire et la fonte des glaciers du Groenland.

La variabilité temporelle (Cf. Fig. 2) est forte, mais le constat reste également stable au niveau de la France entière, avec la confirmation ces dernières années de la persistance du réchauffement.

Quant aux conditions de sécheresse dans le Sud (Cf. Fig. 3), l'analyse des données climatiques du poste INRA-Agroclim d'Avignon fait bien apparaître une suite d'une dizaine d'années sèches, avec augmentation de l'ETP (évapo transpiration potentielle) d'avril-septembre de l'ordre de 100 à 200 mm et la diminution concomitante de la pluie sur la même période d'environ 100 mm : au total, un bilan plus déficitaire de 200 à 300 mm, ce qui n'est pas rien. Certes, les trois dernières années ont été un peu moins extrêmes sur ce plan, mais la tendance générale n'est pas

inversée. Alors, simple épisode de quelques années, qui a eu sensiblement des équivalents dans le passé, ou premières manifestations d'une tendance annoncée plus sèche autour du bassin méditerranéen ?

Il n'y a pas de réponse (Cf. Fig. 4), pas plus que de projections réellement utilisables à court terme (2020-2040, par exemple), dans la mesure où le poids de la variabilité va rester fort par rapport à celui de l'évolution du signal moyen. Et tant qu'on ne sait pas mieux interpréter cette variabilité, les projections doivent être assorties d'une incertitude, elle-même addition de plusieurs sources maintenant mieux cernées par les travaux récents.

A plus long terme (Cf. Fig. 5), on doit donc envisager à la fois une certitude sur le climat, qui sera plus chaud et plus sec en été, mais avec des gammes d'incertitude pour le moment encore assez notables (en premier lieu parce qu'on ne sait pas encore quelles seront nos trajectoires d'émission de gaz à effet de serre).

Quoi qu'il en soit, pour les forêts méditerranéennes, le message reste inchangé pour le climat futur d'après 2050 : plus chaud (2°C sûrement, 3 à 4° sans doute, et plus ... peut-

Variabilité climatique vs changement climatique

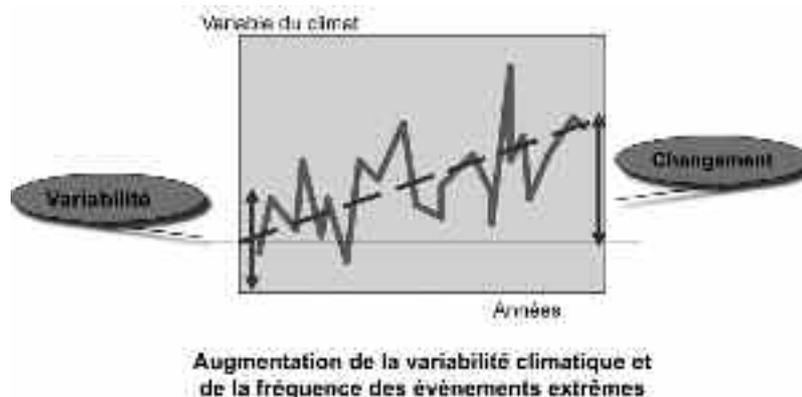


Fig. 4

être), et plus sec, avec une humidité du sol toujours évidemment marquée par une forte variabilité, mais autour d'une valeur moyenne significativement plus faible.

B.S.

Bernard SEGUIN
INRA Mission
"Changement climatique et effet de serre"
Site Agroparc
Domaine Saint-Paul
84914 Avignon
cedex 9
Mél : seguin@
avignon.inra.fr

Des projections avec des incertitudes

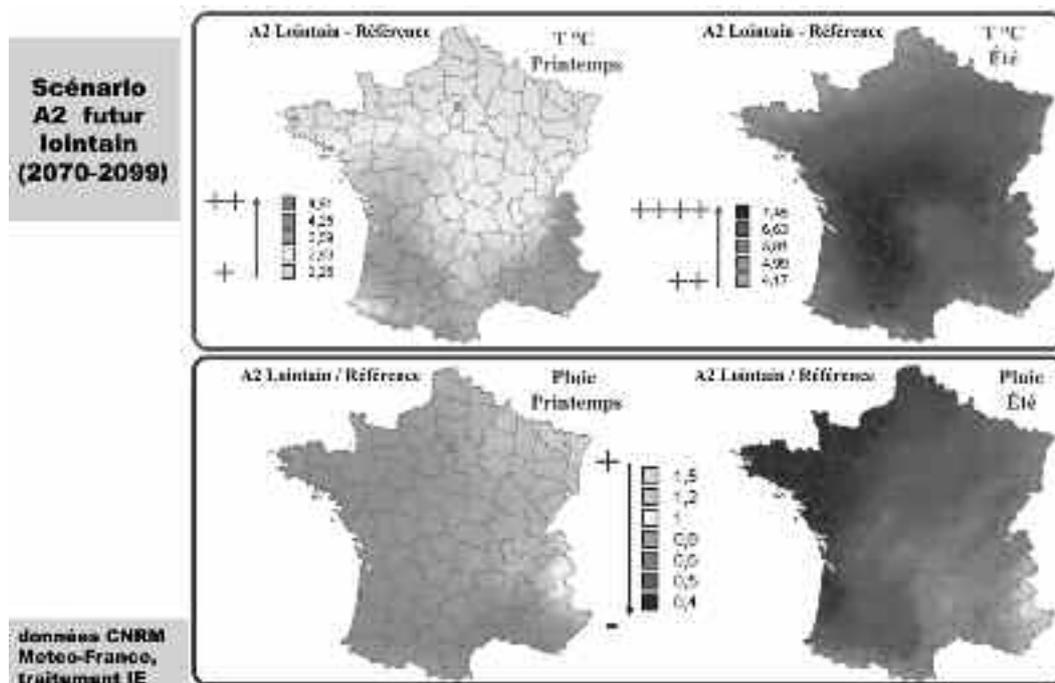


Fig. 5

Résumé

Ces dernières années, un écho plus large donné aux climato-sceptiques, s'appuyant sur la conjonction d'épisodes hivernaux un peu plus rigoureux ou d'un retour à des conditions de sécheresse moins extrêmes en climat méditerranéen, par rapport à l'année 2007, a mis à mal le consensus qui existait à l'époque sur la réalité du changement climatique. Quel peut être le constat, trois ans plus tard ?

Les disparités et fluctuations locales ne doivent pas cacher une tendance globale au réchauffement. Ainsi, si l'été 2003 a été si chaud et sec en France et pour partie en Europe de l'Ouest, il a peu affecté l'Europe de l'Est, alors qu'en 2010, la Russie connaissait des incendies de forêts terribles liés à la sécheresse et la canicule.

Les observations de plus en plus nombreuses et précises montrent que le réchauffement est plus élevé dans l'hémisphère Nord et confirment le recul de la banquise polaire et la fonte de glaciers.

En France, les observations confirment également le réchauffement.

Au niveau local (mesures à Avignon) malgré trois dernières années moins extrêmes, on note une tendance générale vers plus de sécheresse.

Même s'il existe des incertitudes au niveau de la variabilité, une certitude demeure : on ira vers un climat plus chaud et plus sec ; confirmé en Méditerranée (+ 2°C au mieux, plus sec et une humidité du sol plus faible).

Summary

After the 2007 Conference... climate change - what reality and what perception?

Over the last few years, the views of climate-change sceptics have been more widely aired. Basing their stance on the conjunction of slightly more rigorous winter periods and the return to less extreme drought conditions around the Mediterranean when compared to 2007, they have shaken up the previously-existing consensus about the reality of climate change. Three years later, what is the present situation?

Disparities and fluctuations at a local level should not mask the overall trend to warming. While the summer of 2003 was so hot and dry in France and in a part of Western Europe, it hardly affected Eastern Europe whereas in 2010 Russia experienced terrible forest fires related to drought and a heat wave.

Observations that are ever more numerous and precise have shown that warming is greater in the Northern Hemisphere and confirm both the shrinking of the polar ice cap and glacial melting.

In France, observations also confirm global warming. At a local level (monitoring at Avignon), despite three less severe years there remains a general trend towards drier conditions.

Though uncertainty continues as to the degree of variability, one thing remains certain: we are moving towards a hotter, drier climate, confirmed for the Mediterranean (+2°C at the best, drier and with a lower level of ground moisture).

Riassunto

Dopo il colloquio del 2007... Quale realtà e quale percezione del cambiamento climatico ?

Questi ultimi anni, un eco più largo dato ai climato-sceettici, appoggiandosi sulla congiunzione d'episodi invernali un poco più rigorosi o di un ritorno a condizioni di siccità meno estreme in clima mediterraneo, a riguardo dell'anno 2007, ha ridotto in mal punto il consenso che esisteva all'epoca sulla realtà del cambiamento climatico. Qual può essere la constatazione, tre anni dopo ?

Le disparità e le fluttuazioni locali non devono nascondere una tendenza globale al riscaldamento. Così, se l'estate 2003 è stato così caldo e secco in Francia e per parte in Europa dell'ovest, ha poco colpito l'Europa dell'est, mentre nel 2010, la Russia conosceva incendi di foresta terribili legati alla siccità e alla canicola. Le osservazioni sempre più numerose e precise mostrano che il riscaldamento è più alto nell'emisfero nord e confermano l'arretramento della banchisa polare e lo scioglimento dei ghiacciai.

In Francia, le osservazioni confermano anche il riscaldamento.

Al livello locale (misure a Avignone) malgrado tre ultimi anni meno estremi, si nota una tendenza generale verso più di siccità.

Anche se esistono incertezze al livello della variabilità, una certezza rimane : si andrà verso un clima più caldo e più secco ; confermato nel Mediterraneo (+2°C per il meglio, più secco e una umidità del suolo più debole).

Les impacts du changement climatique et l'adaptation des espaces forestiers : coûts des impacts et mesures d'adaptation en métropole

par Pierre BOUILLON

Les effets attendus des changements climatiques sont-ils pris en compte dans l'élaboration des politiques ? Dans cet article, l'auteur nous présente les principaux résultats du rapport interministériel qui a permis une première évaluation quantitative des conséquences possibles du changement climatique sur les forêts françaises. Les premières recommandations et mesures sont présentées, confirmant la prise en compte du phénomène au niveau national, et aussi européen.

Diagnostic climatique : des scénarios inquiétants...

Après une augmentation de 1,1°C de la température moyenne en France métropolitaine au XX^e siècle, les scénarios prévus par les météorologues pour le XXI^e siècle envisagent une augmentation minimale de 2°C de la température moyenne, qui pourrait dépasser 6°C dans un scénario extrême. La première conséquence de cette évolution tendancielle consistera en une augmentation substantielle du nombre de jours de canicule (température maximale supérieure à 35°C) : de 3 à 10 jours par an dans les années 90 sur l'essentiel du territoire, nous passerons à plus de 20 jours ou 50 jours par an (selon les scénarios). Cette évolution sera aussi marquée par un allongement des périodes de sécheresse, une augmentation des pics de chaleur en zone méditerranéenne et une méditerranéisation du climat français dans les moitiés sud et ouest du territoire métropolitain (augmentation du nombre de jours de canicules, sécheresses estivales, pluviométrie hivernale accrue avec épisodes de fortes pluies, baisse de la réserve utile en eau des sols pendant la saison de végétation... Cf. Tab. I).

	Scénario B2	Scénario A2
Températures moyennes annuelles	+ 2 à 2,5°C	+ 3 à 3,5°C
Précipitations hivernales	Augmentation d'environ 25% des jours où les précipitations > 10 mm	
Précipitations estivales	Diminution (plus importante pour A2)	
Périodes de chaleur	7 jours/an où la température maximale dépasse 35°C	14 jours/an où la température maximale dépasse 35°C
Sécheresses estivales	+ 4 jours/an de sécheresse	+ 9 jours/an de sécheresse

attend d'ici la fin du XXI^e siècle va bien au-delà de ces premiers « coups de semonce », car la capacité d'adaptation de certaines espèces actuellement en station de référence pourrait également être soumise à rude épreuve.

Paradoxalement, dans un premier temps (première moitié du XXI^e siècle), hors zone méditerranéenne et hors événements exceptionnels, le changement climatique va produire des éléments favorables à la croissance des arbres : l'augmentation des températures moyennes, la diminution du nombre de jours avec des gelées, l'allongement de la saison de végétation, la plus grande disponibilité en carbone atmosphérique, sont des facteurs très propices à l'augmentation de la croissance des arbres. Ce phénomène, déjà observé ces trois dernières décennies (notamment par la Coopérative de données sur la croissance des arbres), devrait s'accroître lors des prochaines décennies.

Ces tendances a priori positives devront cependant être tempérées par l'augmentation parallèle d'aléas, dont les conséquences sur les massifs forestiers et leurs sols peuvent être considérables et durables (tempêtes sur sols hivernaux détrempés, canicules, incendies, proliférations d'insectes, développement de maladies).

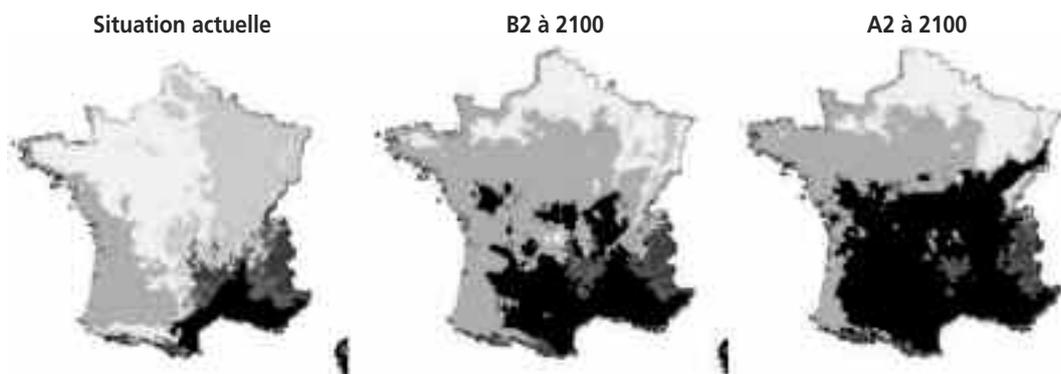
L'impact tendanciel du changement climatique sur les aires de répartition optimales des essences forestières a été spec-

Tab. I :
Extrait du Rapport Roman-Amat, décembre 2007 : prévisions des modèles climatiques français en fonction des scénarios d'émissions de gaz à effet de serre à la fin du XXI^e siècle pour la France
Source : *Planton, 2004*

A ces données de fond s'ajoutera la possible survenue d'événements exceptionnels (tempêtes, sécheresses, canicules) aggravant la pression de sélection climatique sur les espèces composant les forêts françaises.

Bien entendu, les conséquences les plus importantes toucheront en premier lieu les espèces déjà situées en dehors ou en limite de leur station forestière de référence, comme ce fut le cas par exemple après la canicule de 2003, pour certains peuplements résineux situés dans les vallées d'affluents de la rive droite de la Garonne ou sur les coteaux du val de Saône. Mais ce qui nous

	Actuel	2100 scénario B2	2100 scénario A2
Méditerranéen	9,1%	28,1%	47,9 %
Domaine océanique Sud-Ouest	17,2%	45,9%	30,8%
Domaine océanique Ouest	35,6%	17,4%	16,4%
Montagnard	15,6%	5,4%	3,7%
Domaine continental Est	22,4%	3,2%	1,2%



Tab. II (ci-dessus), Fig. 1 (ci-contre) :
Progression des surfaces soumises au climat méditerranéen (en noir sur les cartes) selon les différents scénarios

taculièrement mis en évidence par les cartes issues du projet Carbofor (2004), mentionnées dans le rapport Roman-Amat (Cf. Tab. II et Fig. 1).

La progression du climat méditerranéen vers le nord devrait s'accélérer au cours de ce siècle, mais selon un axe dirigé vers le nord-ouest en contournant le Massif-Central, avec à la gauche de cet axe, les régions Midi-Pyrénées et Poitou-Charentes, à sa droite le couloir rhônalpin et ses prolongements, vers le val de Saône et la vallée du Doubs jusqu'au sud de l'Alsace. Le climat océanique caractérisant actuellement le Sud-Ouest devrait peu à peu migrer vers les latitudes allant de la Bretagne au bassin parisien. La zone océanique ouest se réduirait au Perche, à la Picardie, au Nord et à la Lorraine, tandis que les climats montagnards et continentaux seraient marginalisés, en passant de 38% à seulement 5% du territoire national.

Ces premiers travaux sont en cours d'approfondissement, afin d'enrichir les modèles avec des paramètres complémentaires, susceptibles d'amplifier ou d'atténuer les effets du changement climatique. Il s'agit par exemple de la réserve utile en eau des sols ou encore de la capacité d'adaptation globale des écosystèmes et des grandes essences forestières.

Mais il apparaît indispensable de souligner l'impact des événements exceptionnels : ils perturbent durablement les milieux et déstabilisent sans commune mesure l'économie de la filière forêt-bois. Les tempêtes centennales Lothar (26/12/1999), Martin (27/12/1999) et Klaus (24/1/2009) ont laissé une empreinte sans équivalent dans les siècles passés en termes de volumes de bois chablis :

- 140 millions de m³ pour Lothar et Martin (quatre récoltes commerciales annuelles), dont 50% dans les régions Aquitaine et Lorraine,

- 43 millions de m³ pour Klaus, à 97% en Aquitaine (cinq récoltes annuelles de pin maritime).

Ajoutons que le 28 février 2010, la tempête Xynthia s'attaquait aux forêts dunaires de l'Atlantique et aux forêts de protection du centre des Pyrénées.

En réponse à ces événements exceptionnels, une réponse exceptionnelle a été donnée par les pouvoirs publics, à travers la mise en œuvre, après les tempêtes Lothar et Martin, d'un plan de solidarité nationale

représentant une dépense supérieure au milliard d'euros. Le gouvernement a ainsi porté pendant 10 ans (2000-2009) et mené à son terme un plan chablis ayant permis de stocker des bois, nettoyer et reconstituer les parcelles sinistrées. Après la tempête Klaus, l'Etat s'est de nouveau engagé pour 8 ans (2009-2016) dans un nouveau plan de nettoyage et de reconstitution des forêts sinistrées, très principalement situées dans les Landes de Gascogne.

S'ajoutent aux plans tempêtes, la prévention et la gestion des risques d'incendie. L'année 2003 a marqué les esprits : 70 000 ha de forêts brûlées, soit quatre fois plus que la moyenne annuelle des dernières décennies. Mais d'ici 2050, de tels scénarios pourraient se reproduire plus fréquemment. En effet, les zones sensibles au risque d'incendie devraient représenter des surfaces beaucoup plus importantes qu'aujourd'hui (Cf Fig. 2, la carte de Météo-France à échéance 2050).

Malgré des facteurs positifs pour la croissance des arbres liés à l'allongement de la saison de végétation, nous voyons bien que l'impact de l'instabilité climatique sur les forêts n'a jamais été si élevé, tandis que l'inexorable ascension des températures, nécessitera de suivre de très près les capacités d'adaptation des espèces forestières à leurs nouvelles conditions climatiques et en particulier à des stress hydriques d'ampleur inédite.

Par ailleurs, il ne faut pas négliger la variabilité cachée derrière les moyennes, notamment sous climat méditerranéen. L'évolution tendancielle peut ainsi être marquée par de fortes variations, à l'image de la pluviométrie niçoise : 317 mm de pluie en 2007 et 1030 mm en 2008 ! Il est en outre possible de lire dès à présent dans les relevés de Météo-France des signes avant-coureurs illustrant ce que pourraient être nos futures conditions climatiques : la pluviométrie du mois d'août 2010 et la carte de l'indicateur d'humidité des sols en août 2010 correspondent de façon étonnante aux simulations mettant en évidence une méditerranéisation progressive du climat français au cours du XXI^e siècle.

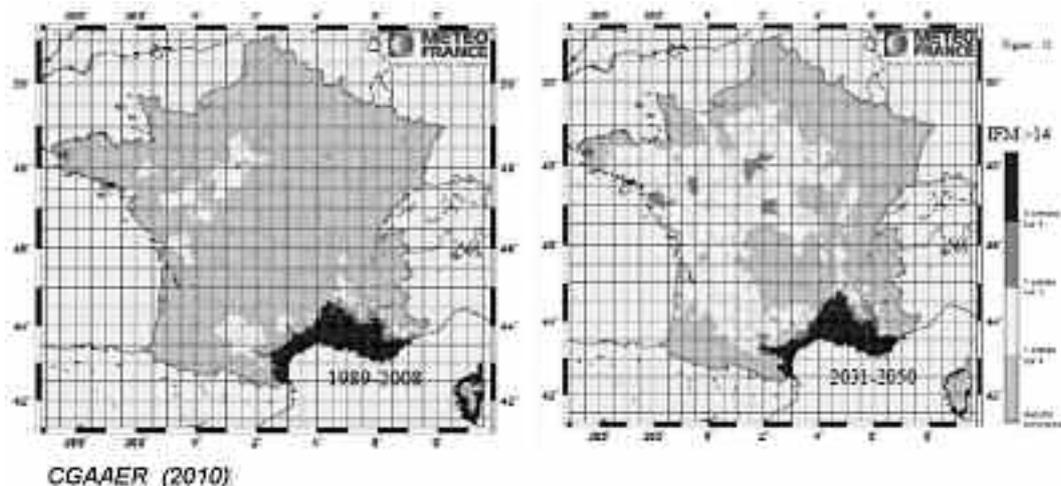
Dans ce contexte, la Commission européenne a demandé à plusieurs organismes scientifiques européens de référence (EFI, BOKU, INRA et Académie italienne des sciences forestières) un rapport, remis en

Fig. 2 :

Extension d'ici 2050
des zones sensibles
aux feux de forêt

NOTA : une modification de la circulation des masses d'air dans le golfe de Gênes pourrait conduire à une augmentation des précipitations dans les Alpes-Maritimes et la Corse montagnarde en saison de végétation, réduisant d'autant l'exposition au risque d'incendie des forêts des trois départements concernés.

Extension d'ici 2050 des zones sensibles aux feux de forêt



novembre 2008, sur « *Les impacts du changement climatique sur les forêts européennes et les options pour l'adaptation* ». Elle s'est ensuite attelée à la rédaction d'un livre vert sur le changement climatique et la protection des forêts (mars 2010), lui-même complété par le rapport d'un groupe de travail du Comité permanent forestier européen sur le changement climatique et la sylviculture. L'ensemble de ces documents décrit les nombreux risques pesant sur les forêts européennes et alerte les autorités publiques sur la nécessité de prévoir dès à présent une stratégie communautaire et des stratégies nationales d'adaptation au changement climatique. Ces contributions nourrissent les réflexions en cours visant à rapprocher la stratégie communautaire pour l'adaptation des forêts au changement climatique et la préparation des futures orientations de la politique agricole commune à compter de 2014 (volet forestier de la politique européenne de développement rural).

Notons que la forêt ne fait pas partie des compétences communautaires figurant dans le traité de Rome, mais que beaucoup de politiques communautaires ont un impact sur la forêt. Cela justifie qu'une coordination soit organisée (Comité permanent forestier) et qu'une stratégie forestière communautaire soit définie. Autour de cette stratégie, différents outils financiers et réglementaires sont mis à disposition de chaque Etat membre. Les pays peuvent ainsi élaborer la stratégie

nationale la plus adaptée à leurs enjeux. Il est notamment possible d'appuyer la politique forestière nationale sur un important volet forestier du plan de développement rural hexagonal (second pilier de la PAC, le premier étant constitué des aides directes aux agriculteurs).

La France a par exemple massivement utilisé le volet forestier du développement rural pour financer la reconstitution des forêts sinistrées par les tempêtes Lothar et Martin (près de 90% du cofinancement communautaire dédié à la forêt sur la période 2000-2006). De même, à compter de 2014, il pourrait être envisagé d'utiliser cet outil pour commencer à financer, à travers des mesures ciblées, l'adaptation progressive des forêts françaises au changement climatique.

Soulignons que sur le volet atténuation du changement climatique, par le stockage de carbone en forêt et par l'utilisation du bois-matériau et du bois comme source d'énergie renouvelable, la forêt a un rôle majeur à jouer dans la mise en œuvre du "Paquet Energie-Climat", adopté par l'Union européenne en décembre 2008 et prévoyant à l'horizon 2020 :

- moins 20% d'émissions de gaz à effet de serre (plus grande utilisation du bois et fonction puits de carbone des forêts) ;
- plus 20% d'énergies renouvelables (rôle majeur de la biomasse) ;
- moins 20% de consommation énergétique (développement de l'efficacité énergétique).

Première évaluation des conséquences du changement climatique pour la forêt française, avec la réalisation d'une étude sur l'évaluation du coût des impacts du changement climatique dans le secteur forestier

L'Institut FCBA et le laboratoire EconomiX (Paris-X-Nanterre) ont effectué au premier semestre 2010 une première évaluation quantitative des conséquences possibles du changement climatique sur les forêts françaises. La quantification et les scénarios proposés ont été volontairement simplifiés et limités aux critères de productivité des forêts (volumes de bois produits et gains économiques potentiels), selon deux horizons de temps : le moyen terme avec une hausse du taux moyen de croissance (2030 pour A2, 2050 pour B2) et le long-terme (jusqu'en 2100), avec une baisse de ce taux. La simplification a notamment conduit à intégrer des paramètres d'économie constante et d'absence de catastrophes naturelles exceptionnelles (méthodologie imposée par le ministère de l'Ecologie).

Sur le moyen terme, les impacts du changement climatique sont favorables (augmentation de la durée de la saison de végétation, plus grande disponibilité en carbone atmosphérique), puisque n'est pris en compte que l'effet volume de bois à prix constants (niveaux actuels).

Le long-terme paraît plus défavorable, avec des coûts plus importants et des recettes potentielles moindres. Le chiffre à 2100 n'a pas été réalisé, du fait d'incertitudes encore plus grandes à cet horizon, en particulier sur le facteur hydrique.

Selon le scénario « changement climatique et productivité des forêts », sur le moyen terme, la production brute supplémentaire atteindrait en fin de période près de 30 millions de m³ (dont 70% en bois d'œuvre), soit des recettes potentielles cumulées sur cette période (à prix constants) de 3,1 milliards d'euros selon A2 (jusqu'à 2030) et de 7,2 milliards d'euros pour B2, du fait d'une période d'occurrence plus longue (jusqu'à 2050).

Le second scénario « valorisation + » est une variante du scénario précédent. Ont été

introduits des volumes récoltés supplémentaires, en lien avec les objectifs assignés à la forêt à échéance 2020 (Directive EnR, Grenelle de l'Environnement, Assises de la Forêt), ainsi que les volumes susceptibles d'être consommés par les projets CRE. Ce scénario traduit de façon implicite une mesure « sans regret », car plus grande est la récolte, plus les risques associés au changement climatique diminuent.

En conclusion de cette étude, il ressort que des gains en productivité sont envisageables pendant la première moitié du XXI^e siècle... sous réserve qu'ils ne soient pas annulés par des catastrophes climatiques (tempêtes, sécheresses). Pendant la seconde moitié du siècle, les facteurs seront clairement défavorables : baisse tendancielle de la productivité et augmentation des risques d'événements exceptionnels.

Si l'on se réfère à la période 1999-2010, on observera qu'en dépit de conditions tendanciellement plus favorables (poursuite de la hausse des températures moyennes et de la disponibilité en carbone atmosphérique), les accidents climatiques ont été nombreux (tempêtes centennales Lothar, Martin et Klaus, canicule d'août 2003) et ont fait plus qu'annuler les gains attendus. Les tempêtes Lothar et Martin ont, par exemple, fait l'objet d'un plan gouvernemental sur 10 ans ayant absorbé l'essentiel des moyens d'intervention destinés à la politique forestière, tandis qu'avant même la fin de ce plan, la tempête Klaus (24 janvier 2009) nécessitait la mise en place d'un nouveau plan gouvernemental, sur 8 ans, également très coûteux.

L'exercice a mis en lumière la possibilité d'évaluer des gains, mais surtout la quasi impossibilité de modéliser la survenue et les conséquences des événements exceptionnels (tempêtes, incendies, canicules) : outre la perte des revenus liés au matériau bois (dépendant de la nature et de l'intensité de l'événement exceptionnel, de la conjoncture économique au moment de la catastrophe) et des conséquences spécifiques aux incendies de forêt (menaces pour les habitants et les logements), l'impact peut en outre s'avérer considérable en termes de dégradation des services écosystémiques assurés par la forêt.

Une absence de reconstitution du couvert forestier peut entraîner une moindre recharge des nappes phréatiques en hiver, une diminution locale de l'humidité atmosphérique et des échanges hydriques entre

1 - A l'adresse :
http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/partie_1_rapport_de_synthese.pdf

2 - A l'adresse :
http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/partie_3_rapports_des_groupes_sectoriels.pdf

3 - A l'adresse :
http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/rapport_concertation_adaptation_17_06_2010.pdf

l'air et le sol (cycle de l'eau), une augmentation de l'érosion hydrique et éolienne du sol, l'apparition de coulées de boue (en particulier sur bassins versants), la dérégulation des débits des cours d'eau, une perte de productivité des forêts et terres agricoles alentour, une diminution des ressources disponibles en eaux souterraines affectant l'ensemble des utilisateurs, la perte de biodiversité liée à l'altération de l'écosystème forestier et, bien sûr, l'affaiblissement de la fonction « puits de carbone », en raison de la non reconstitution du puits.

De tels impacts sont bien entendu très difficiles à évaluer, à chiffrer, en particulier aux horizons 2030, 2050 et 2100. La valeur économique des multiples fonctions assurées par les forêts étant peu prises en compte par le marché, il est d'autant plus difficile de construire un modèle d'évaluation du coût pour la collectivité des impacts cumulés du changement climatique sur les forêts françaises.

L'étude FCBA/EconomiX a également abordé le thème des principales vulnérabilités de la forêt française face au changement climatique. L'exposition au risque d'incendie de forêt s'étend de la zone méditerranéenne vers le sud-ouest de la France. Elle devient sensiblement plus élevée dans le sud-ouest et au sud du Massif-Central, gagne peu à peu le Centre et l'ouest de la France.

De façon générale, la sensibilité des forêts et de leurs espèces principales au stress hydrique devrait permettre d'établir des cartes de vulnérabilité, tenant compte à la fois des espèces présentes, du contexte pédoclimatique et de leur capacité d'adaptation lorsque ce contexte change. Le projet Carbofor l'a illustré avec le cas du hêtre, espèce particulièrement sensible au stress hydrique, qui lors de la canicule d'août 2003, avait spectaculairement réagi en sacrifiant au mois d'août son couvert foliaire, afin d'interrompre toute évapotranspiration liée à l'activité photosynthétique. A échéance 2100, l'espèce pourrait disparaître d'une grande partie de son aire naturelle actuelle, mais dans l'immédiat sa productivité annuelle augmente... hors tempêtes. Celle-ci a augmenté au XX^e siècle de 25% dans le Nord-Ouest et de 50% dans le Nord-Est.

Le rapport de synthèse de *l'Evaluation du coût des impacts du changement climatique et de l'adaptation en France* est téléchargeable¹ sur Internet, ainsi que celui du groupe sectoriel Forêt².

Préparation du Plan national d'adaptation au changement climatique

A la suite de cette première étape consistant à tenter d'évaluer les coûts des impacts du changement climatique, le ministère chargé du changement climatique a lancé en décembre 2009 le chantier de la préparation d'un Plan national d'adaptation au changement climatique (PNACC). Des groupes de travail « grenelliens » (associant la société civile) ont été constitués, dont un concernant la forêt. Les travaux de ce groupe de travail ont fait l'objet d'un rapport constitué des recommandations de l'ensemble des groupes de travail thématiques. Ce document adopté et présenté par Chantal Jouanno en juin 2009, est consultable sur Internet³.

Il comporte dix recommandations pour la forêt, qui peuvent être rassemblées dans trois thèmes principaux :

1 - Meilleure connaissance et suivi des impacts du changement climatique sur les écosystèmes :

- collecter les données écologiques, promouvoir et organiser leur disponibilité, ainsi que le suivi des impacts sur les écosystèmes ;
- poursuivre et intensifier la R&D sur l'adaptation des forêts au changement climatique ;
- appuyer les politiques nationales d'adaptation des forêts au changement climatique sur des démarches locales et concertées.

2 - Gestion forestière adaptative :

- favoriser l'adaptation des peuplements ;
- conserver et adapter les ressources génétiques forestières ;
- adapter la gestion à l'évolution de la productivité forestière.

3 - Prévention et gestion des risques :

- préserver la fonction de protection des forêts vis-à-vis des risques naturels ;
- prévenir un risque accru d'incendies ;
- gérer les conséquences en forêt des événements climatiques exceptionnels ;
- améliorer la couverture des sylviculteurs contre les aléas climatiques, via le dévelop-

pement de systèmes assurantiels (en quantité et en qualité).

La publication de ce rapport a été suivie d'une phase de concertation, de juillet à octobre 2010 (internet, réunions publiques, consultation de l'Assemblée nationale et du Sénat). Une consolidation des contributions a eu lieu en novembre 2010, avant que ne commence la dernière étape, celle de la rédaction des fiches du Plan National d'Adaptation au Changement Climatique (PNACC), qui doit être adopté au cours de l'été 2011.

La mise en œuvre des différentes actions du PNACC s'étalera sur 5 années, à l'issue desquelles une évaluation sera réalisée.

S'agissant de la forêt, il est envisagé de proposer cinq fiches action rassemblant les thématiques suivantes :

Action n°1 : Poursuivre et intensifier la recherche-développement sur l'adaptation des forêts au changement climatique ;

Action n°2 : Collecter les données écologiques, promouvoir et organiser leur disponibilité, ainsi que le suivi des impacts sur les écosystèmes ;

Action n°3 : Favoriser la capacité d'adaptation des peuplements forestiers et préparer la filière bois au changement climatique ;

Action n°4 : Préserver la biodiversité ainsi que les services rendus par la forêt vis-à-vis des risques naturels ;

Action n°5 : Anticiper et gérer les événements climatiques extrêmes.

Le contenu détaillé de ces cinq actions sera rendu public au cours de l'été 2011. Mais dès à présent, il convient de souligner que le ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation, de la Pêche, de la Ruralité et de l'Aménagement du territoire a déjà initié une partie de ces actions, qu'il conviendra de renforcer, car elles apparaissent stratégiques pour l'avenir des forêts françaises en contexte de changement climatique.

Parmi ces actions de long terme portées par le MAAPRAT, qu'il est envisagé d'amplifier dans le contexte du PNACC, figurent notamment les travaux de la Commission Ressources génétiques forestières.

Celle-ci a été mise en place et soutenue par le ministère chargé des forêts depuis 1991, en application d'une résolution adoptée lors de la conférence ministérielle paneuropéenne de Strasbourg pour la protection des forêts

en Europe (1990). Cette Commission scientifique nationale oriente les stratégies de conservation mises en œuvre en France pour 10 espèces forestières indigènes (réseaux de conservation in-situ et ex-situ). Elle rassemble les organismes scientifiques, les pépinières conservatoires de l'Etat, les gestionnaires publics et privés, FNE et l'administration.

Ses objectifs sont l'inventaire et la conservation, pour les espèces majeures, disséminées ou menacées de disparition, des populations représentatives de la diversité génétique de l'espèce à l'échelle nationale.

La conservation in situ concerne très majoritairement la forêt publique et fait l'objet d'une gestion spécifique par l'ONF, qui veille à la bonne régénération naturelle de ces ressources génétiques.

La conservation ex situ est assurée par les pépinières conservatoires de l'Etat, à Aix-en-Provence pour le climat méditerranéen, Guéméné-Penfao pour le climat océanique, Peyrat-le-Château pour le climat continental et montagnard. Celle-ci concerne prioritairement les espèces menacées (pin de Salzmann, ormes, peuplier noir, noyer) ou ayant un caractère disséminé ne permettant pas la mise en place d'une conservation in situ efficace (feuillus précieux).

Les progrès de la recherche sur la détermination des critères de vulnérabilité des essences doivent permettre de définir les prochaines priorités de conservation in situ et ex situ. L'identification et la conservation de ces ressources génétiques est éminemment stratégique pour l'adaptation des forêts françaises à leurs futures conditions climatiques.

Le message de la CRGF concernant le changement climatique pourrait être sommairement résumé comme suit :

– face à des conditions climatiques en évolution continue, mais avec de fortes variations annuelles et régionales, il convient de valoriser la richesse génétique des populations, en favorisant, autant que possible, leur grande capacité adaptative ;

– il est recommandé aux sylviculteurs d'apporter des réponses graduées en fonction des risques auxquels sont exposés les massifs forestiers et de s'assurer d'une bonne caractérisation des causes de ce qui peut être interprété comme un début de dépérissement, à l'échelle du massif ou de la région,



Photo 1 :
Effets de la canicule
de 2003 dans le Luberon

avant de prendre des décisions « lourdes » et coûteuses en investissements.

La photo 1 illustre les effets de la canicule d'août 2003 dans le Luberon, effets spectaculaires, mais qui se sont révélés réversibles, le cycle de dépérissement ayant depuis été interrompu (Cf. Photo 1).

Le ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation, de la Pêche, de la Ruralité et de l'Aménagement du territoire a par ailleurs engagé depuis plusieurs décennies une politique résolue de sélection et d'amélioration des espèces forestières les plus utilisées en reboisement forestier. Il s'est notamment appuyé sur le Cemagref, l'INRA et la section Arbres forestiers du CTPS. Cette politique publique s'est traduite par l'inscription de peuplements porte-graines sélectionnés par le Cemagref (1650 peuplements couvrant 63 000 ha, pour 21 espèces), mais aussi de vergers à graines et de matériels clonaux répondant aux besoins des sylviculteurs.

Parmi les accomplissements de cette politique, figure la création de vergers à graines à base génétique large, afin de garantir une capacité d'adaptation maximale, de surcroît en contexte climatique évolutif. Les vergers à graines de l'Etat représentent ainsi un investissement à très long terme, mené sur plusieurs décennies et alliant plusieurs objectifs complémentaires :

- améliorer la productivité des forêts françaises en quantité et en qualité ;

- sélectionner des génotypes d'avenir pour l'adaptation des forêts au changement climatique,

- renforcer une capacité d'adaptation assise sur de larges bases génétiques ;

- diversifier l'offre de vergers, afin de permettre aux sylviculteurs de choisir les matériels génétiques les mieux adaptés aux conditions climatiques présentes et futures de leurs forêts ;

- conserver des collections nationales ex-situ qui ne sont pas présentes dans les pépinières conservatoires de l'Etat.

Cet investissement a été porté par l'Etat, car il n'intéresse pas le secteur privé : il nécessite en effet une action double, consistant à financer à la fois une recherche publique finalisée et un dispositif unique de transfert dans le domaine des Vergers à graines de l'Etat, piloté par un Comité technique de coordination, associant gestion et recherche finalisée (Cf. Photo 2).

En conclusion de ce panorama dressé depuis Marseille, la région méditerranéenne reste bien entendu la plus exposée au changement climatique, à travers l'augmentation des risques d'incendie et de sécheresse (à l'exception notable des Alpes-Maritimes et de la Corse montagnarde). Ces risques menacent en premier lieu les forêts couvrant des sols à faible réserve utile en eau.

Afin de préparer au mieux l'adaptation des forêts méditerranéennes, il importera dans un premier temps de recenser scrupuleusement toutes les données relatives aux effets du changement climatique sur ces forêts, afin d'établir des diagnostics de vulnérabilité, tout en veillant à conserver les populations les plus remarquables, in situ ou ex situ (si nécessaire). L'intérêt de ces ressources génétiques pour les générations futures sera d'autant plus grand à l'échelle européenne qu'elles constitueront des îlots de survie en limite sud des aires de répartition des espèces.

L'exposition des forêts méditerranéennes aux risques climatiques sera documentée et caractérisée de façon croissante au fil des résultats publiés par la recherche. Ces analyses permettront à l'Etat, mais aussi aux gestionnaires, de définir au plus juste les priorités de la prévention des risques et de l'adaptation au changement climatique.

Les forêts méditerranéennes constitueront à cette occasion une sorte de laboratoire des stratégies d'adaptation à mettre en œuvre au

niveau national, puisque les risques y sont plus élevés et les solutions génétiques limitées, dans la mesure où le Sud est « barré » par la mer Méditerranée et les barrières alpines et pyrénéennes sont également difficiles à franchir. L'Etat et les gestionnaires de forêts méditerranéennes sont néanmoins prêts à relever cet immense défi de l'adaptation des forêts à un changement climatique exceptionnellement rapide.

P.B.



Photo 2 :

Parmi les 300 ha de vergers à graines de l'Etat, certains apporteront peut-être dans les années à venir des solutions génétiques aux problèmes rencontrés dans certains massifs, par exemple avec des variétés californiennes de douglas ou avec des sapins méditerranéens (ci-dessous un verger à graines d'*Abies bornmulleriana*, issu de provenances turques).

Résumé

Les impacts du changement climatique et l'adaptation des espaces forestiers : coûts des impacts et mesures d'adaptation en métropole

Le taux de réchauffement de la température moyenne à la surface de la Terre (+ 0,74 °C au XX^e siècle et + 1,1°C en France) a été, au cours des 50 dernières années, deux fois plus important que celui des cent dernières années. Le réchauffement attendu au cours du XXI^e siècle devrait au minimum être compris entre + 2 et + 3 °C. A cette tendance de fond s'ajoute la survenue répétée d'événements extrêmes (tempêtes, sécheresses favorisant les incendies), susceptibles d'occasionner des sinistres forestiers considérables, entraînant des pertes de valeur économique, mais aussi un affaiblissement des fonctions écologiques de la forêt, nécessitant une intervention publique.

Afin de préparer l'adaptation de la forêt française aux conséquences du changement climatique, le ministère chargé de la forêt et du bois a demandé au FCBA, en octobre 2009, une première évaluation du coût des impacts du changement climatique dans le secteur forestier. De son côté, la Commission Européenne publiait en novembre 2008 un rapport rédigé par plusieurs instituts scientifiques sur les impacts et l'adaptation au changement climatique, ainsi qu'un livre vert de la Commission en mars 2010 et, fin 2010, un rapport de la Commission sur la forêt et le changement climatique. Ces documents ont permis d'enrichir la rédaction du volet forestier du Plan national d'adaptation au changement climatique, qui devrait être adopté au cours de l'été 2011.

La région méditerranéenne est bien entendu la plus exposée à l'augmentation des risques d'incendie et de sécheresse, menaçant en premier lieu les forêts qui couvrent des sols à faible réserve utile en eau. Des diagnostics de la vulnérabilité des forêts aux risques climatiques devront être établis, afin de définir au plus juste les priorités de la politique de prévention des risques mise en œuvre par l'Etat.

Pierre BOUILLON
Chargé de mission
Ressources génétiques forestières
Ministère de
l'Agriculture, de
l'Alimentation, de la
Pêche, de la Ruralité
et de l'Aménagement
du territoire
DGPAAT/SFRC/Sous-
Direction de la forêt
et du bois/Bureau
des investissements
forestiers
19, Avenue du Maine
75732 Paris Cedex 15
Mél : pierre.bouillon@
agriculture.gouv.fr

Summary

Impact of climate change and the adaptation of forest tree species: costs of the impact and adaptive measures in metropolitan France

The rate of increase in the average temperature at ground level worldwide (+0.74°C during the 20th century, +1.1°C in France) has been twice as fast over the last 50 years as over the last 100. The warming expected in the course of the 21st century should be, at a minimum, between +2°C and +3°C. Along with this basic trend, there also repeatedly occur extreme events (storms, wildfire-friendly drought) capable of causing major damage to forests, resulting not only in economic loss but also in a loss in the ecological functions of woodlands, to the point that public authorities must intervene.

In October 2009, with the aim of preparing the adaptation of French forests to the consequences of climate change, the ministry in charge of forests and wood asked the FCBA (technological institute) for a first assessment of the costs of the impact of climate change on the forestry sector. Elsewhere, the European Commission published in November 2008 a report produced by several scientific institutes on the impact of and adaptation to climate change, as well as a green paper from the Commission itself in March 2010 and then, at the end of 2010, a report by the Commission on forests and climate change. These works have enriched the contents of the forestry section of the National Plan for Adapting to Climate Change which is to be adopted during the summer of 2011.

The Mediterranean countries are, of course, the most exposed to the risks of wildfire and drought which threaten first of all woodlands growing on soils with scarce reserves of groundwater. Diagnosing the vulnerability of forests to climate-related risks should be carried out in order to establish as carefully as possible the priorities in a policy for risk prevention implemented by the national government.

Riassunto

Gli impatti del cambiamento climatico e l'adattamento degli spazi forestali : costi degli impatti e provvedimenti di adattamento in metropoli

Il tasso di riscaldamento della temperatura media alla superficie della terra (+0,74°C nel XX° secolo e +1,1°C in Francia) è stato nel corso dei 50 ultimi anni, due volte più importante di quello dei centi ultimi anni. Il riscaldamento atteso nel corso del XXI° secolo dovrebbe al minimo essere compreso tra +2 e +3°C. A questa tendenza di fondo si aggiunge la sopravvenienza ripetuta di eventi estremi (tempeste, siccità favorendo gli incendi), suscettibili di causare sinistri forestali considerevoli, cagionando perdite di valore economico, ma anche un indebolimento delle funzioni ecologiche della foresta, necessitando un intervento pubblico.

Per preparare l'adattamento della foresta francese alle conseguenze del cambiamento climatico, il ministero incaricato della foresta e del legno ha chiesto al FCBA in ottobre 2009 una prima valutazione del costo degli impatti del cambiamento climatico nel settore forestale. Dalla sua parte la Commissione Europea pubblicava in novembre 2008 un rapporto redatto da parecchi istituti scientifici sugli impatti e l'adattamento al cambiamento climatico, e anche un libro verde della Commissione in marzo 2010 e, fine 2010 un rapporto della commissione sulla foresta e il cambiamento climatico. Questi documenti hanno permesso di arricchire la redazione dell'elemento forestale del Piano nazionale d'adattamento al cambiamento climatico, che dovrebbe essere adottato nel corso dell'estate 2011.

La regione mediterranea è certamente la più esposta all'aumento dei rischi di incendio e di siccità, minacciando in primo posto le foreste che coprono suoli a debole riserva utile in acqua. I diagnosi della vulnerabilità delle foreste ai rischi climatici dovranno essere stabiliti, per definire esattamente le priorità della politica di prevenzione dei rischi messa in opera dallo Stato.

La forêt dans le Plan Climat du Pays d'Aubagne et de l'Etoile : de la stratégie à la mise en œuvre

par Jean-Marie RAME, Christelle DEBLAIS et André GORLIER

L'exemple de la communauté d'agglomération du Pays d'Aubagne et de l'Etoile est intéressant à double titre. Nous avons ici une collectivité qui a fait le choix politique de pas subir le changement climatique et qui se propose d'anticiper les évolutions climatiques à travers la mise en place d'une politique d'adaptation. Ce territoire est aussi exemplaire en matière forestière, car tout en utilisant les outils déjà existants à sa disposition, il s'ouvre au monde de la recherche et de l'expérimentation pour essayer de répondre concrètement aux nombreuses interrogations qui demeurent.

Le territoire du Pays d'Aubagne et de l'Etoile

La Communauté d'agglomération du Pays d'Aubagne et de l'Etoile regroupe douze communes et 101 253 habitants. La plus grande ville de ce territoire est Aubagne, elle compte 45 088 habitants.

Le territoire de la communauté s'étend sur une superficie de 241 km², avec une densité de population de 375 hab./km². Ce territoire se compose de 68% d'espaces naturels et de 10% de zones agricoles, il héberge 2 500 entreprises.

Les 68% d'espaces naturels du territoire, qui représentent plus de 16000 ha, sont organisés en six grands massifs : Chaîne de Saint-Cyr, Douard, Etoile, Garlaban, Régagnas, Sainte-Baume (Cf. Fig. 1).

La stratégie environnementale de la communauté

Quelques étapes importantes de la politique environnementale de l'Agglo :

– de 2006 à 2009 : un Plan Local Energie Environnement, signé avec l'Ademe et la Région PACA, est mis en place ;



Fig. 1 (ci-dessus) :
Cartes de situation
du territoire du pays
d'Aubagne et de l'Etoile
et des massifs forestiers



– en février 2007 : la démarche Développement Durable de l'Agglo est reconnue par le ministère de l'Écologie et du Développement Durable ;

– en 2008 : la démarche Agenda 21 - Plan Climat Territorial est lancée.

L'Agenda 21 est un programme d'actions qui s'appuie sur cinq principes : un pilotage organisé, la participation des acteurs, la transversalité, et l'évaluation suivant une démarche d'amélioration continue.

Les cinq finalités de l'Agenda 21 sont :

- la lutte contre le changement climatique,
- la préservation de la biodiversité, la protection des milieux et des ressources,
- l'épanouissement de tous les êtres humains,
- la cohésion sociale et la solidarité entre les territoires et entre les générations,
- la dynamique de développement suivant des modes de production et de consommation responsables.

Le Plan Climat vise à lutter contre les émissions de gaz à effet de serre (GES) et préparer l'adaptation du territoire au changement climatique. Il s'inscrit en parfaite cohérence avec l'Agenda 21, car il en constitue le volet « lutter contre le changement climatique ».

Les trois phases du Plan Climat territorial

Le Plan Climat territorial comprend trois phases :

1. une phase **diagnostic** : Bilan Carbone® et diagnostic de vulnérabilité face au changement climatique (forêt, biodiversité, risques, agriculture...);

2. une phase de **concertation** avec les acteurs du territoire ;

3. une phase **d'élaboration du Plan d'action**, avec comme **premiers** objectifs : des plans de massif « durables » et un Observatoire de la biodiversité à la Font de Mai.

Photo 1 (ci-contre) :

En montant la Sainte-Baume, vue sur Auriol et le massif du Regagnas

Photo A. G.

En ce qui concerne la première phase de diagnostic, les impacts attendus sur les massifs du territoire sont les suivants :

– pour les Massif du Garlaban et de l'Etoile : une vulnérabilité forte avec un dépérissement du pin sylvestre, un stress hydrique pour toutes les strates et des attaques parasitaires ;

– pour le Massif de la Sainte-Baume : une vulnérabilité forte avec une colonisation par le pin d'Alep, le dépérissement du pin sylvestre, des attaques parasitaires et une pollution à l'ozone ;

– pour le Massif du Régagnas : une vulnérabilité moyenne à forte (à la condition qu'il n'y ait pas d'incendie), avec une remontée du pin d'Alep et un dépérissement du pin sylvestre.

La mise en œuvre du Plan Climat et la forêt

Elle a consisté dans un premier temps à identifier les enjeux forestiers du territoire, liés au changement climatique :

– dépérissements et régression de certains peuplements (pin sylvestre, chêne pubescent...),

– extension et remontée d'autres peuplements (pin d'Alep...),

– capacité de régénération du pin d'Alep,

– diminution de la productivité forestière du pin d'Alep à moyen terme,

– développement des formations basses (garrigue) et dégradation des milieux (des sols),

– attaques parasitaires,

– fragmentation des peuplements,

– érosion de la biodiversité,

– renchérissement du risque incendie, gestion des interfaces forêt-habitat.

Actuellement, la communauté s'appuie sur l'outil qu'elle a à sa disposition, le PIDAF (Plan intercommunal de débroussaillage et d'actions forestières) du Garlaban, pour mettre en œuvre sa politique.

Grâce au PIDAF, depuis 15 ans, des actions sont menées, prioritairement en matière de DFCI (Défense des forêts contre l'incendie) mais aussi sur les aspects de mul-



tifonctionnalité : accueil du public, sylvopastoralisme, concertation...

Mais les nouveaux enjeux, comme lutter contre "l'appauvrissement" de la biodiversité et donc des paysages (perte de l'étage mésophile avec généralisation de l'étage thermophile), conduisent à définir de nouvelles mesures d'adaptation.

Les principes de gestion retenus sont les suivants :

– adapter la gestion en fonction des milieux,

Photo 2 :

Vue sur le Garlaban depuis la propriété communautaire de la Font de Mai
Photo A.G.

Photo 3 :

Sylvopastoralisme dans le massif du Garlaban
Photo A.G.





Photos 4 et 5 :
Travaux de DFCI avec
coupe et vente de bois
Photo A. G.

Jean-Marie RAME
Christelle DEBLAIS
André GORLIER
Communauté
d'agglomération
Pays d'Aubagne
et de l'Etoile
Service
Environnement - Forêt
932, av. de la Fleuride
Z.I. Les Paluds
B.P. 1415 - 13785
Aubagne Cedex
Tél. : 04 42 62 85 38
Fax : 04 42 62 85 05
www.agglo-
paysdaubagne.com
andre.gorlier@agglo-
paysdaubagne.fr

- se donner les moyens de pérenniser la forêt sur les zones les plus favorables,
- expérimenter à l'échelle du territoire : ne pas subir le changement climatique,
- attentes de recommandations en matière de sylviculture.

L'objectif est que, demain (étude en cours), la communauté puisse mettre en place des plans de massifs durables, dans un esprit de continuité mais aussi d'anticipation :

- en favorisant l'expérimentation avec le monde de la recherche et du développement, mais se pose alors la question du financement de ces actions ;
- en prévoyant la capacité d'adaptation aux différents modèles de gestion sylvicole qui peuvent s'offrir à nous.

Quelques pistes existent, mais beaucoup d'interrogations demeurent :

- favoriser le pin d'Alep dans des peuplements mélangés : mais où ? quelles expérimentations ? quid du chêne ?

- accompagner la régénération naturelle ?
- promouvoir une sylviculture avec des tranches d'âge différentes pour répondre aux dégâts climatiques ?
- favoriser des rotations courtes sur les secteurs très favorables pour éviter le dépeuplement ?
- faire des reboisements exploitables en diversifiant les espèces avec des semences et des plants adaptés, mais quelles espèces choisir (feuillus, résineux) ?
- développer l'agroforesterie ? mais suivant quel aménagement agricole, quelle compatibilité entre l'agricole et le forestier ? quelles cultures associées ? comment évaluer la compétition avec l'eau, la lumière, le sol (bactérie, toxines) ?
- quel cortège d'arbres planter avec le pin d'Alep ? (Danger des attaques parasitaires, des dégâts climatiques dans le cas de peuplement monovariétal...).

Conclusion

Comme on le voit, beaucoup d'interrogations subsistent quant aux actions à mettre en œuvre.

Pour nous, demeure une seule certitude : celle de ne point attendre et subir les effets du changement climatique. Bien au contraire nous pensons qu'il est nécessaire d'anticiper, d'agir. Cela suppose du dynamisme, de l'innovation mais, surtout, beaucoup d'échanges, de confrontations, de partage avec les différents acteurs du monde forestier. Le gestionnaire, qu'il soit public ou privé, ne peut travailler seul ; l'apport de la recherche, des expériences conduites par ailleurs sont indispensables et peuvent, doivent, permettre d'apporter des réponses dans les modes de gestions à adopter.

**J.-M.R.
C.D.
A.G.**

Observer la nature, une problématique "science citoyenne" ?

par Daniel MATHIEU

***Comment faire comprendre
les enjeux liés aux changements
climatiques à la société ?
Comment anticiper les incompréhensions
et les conflits d'analyse
et de perceptions ? Comment
sortir du débat entre techniciens
"initiés", pour être capable
de parler avec et vers
le grand public ?
Au moment où l'on ressent
la nécessaire prise de conscience
des populations sur les risques,
le développement des sciences
citoyennes est un moyen de rendre
les citoyens actifs.
En effet, intégrer sciences
de la nature et société devient
indispensable pour une meilleure
évaluation des enjeux liés au
changement climatique.***

À l'origine des sciences citoyennes

Il y a deux siècles et jusqu'au début du XX^e, la plupart des scientifiques gagnaient leur vie en exerçant une autre profession. Benjamin Franklin (1706-1790) était imprimeur, diplomate et politicien ; Charles Darwin (1809-1888) voyageait sur le Beagle comme compagnon de route du capitaine Robert FitzRoy, pas en tant que professionnel de la nature ; l'abbé Hippolyte Coste (1858-1924), auteur de l'une des plus fameuses flore de France (1900-1906), était professeur de latin puis curé de campagne dans l'Aveyron ; Jean-Henri Fabre (1832-1915) notre illustre entomologiste a été tour à tour instituteur, professeur de physique puis de sciences naturelles dans le Vaucluse. L'émergence de la recherche comme métier à part entière est un phénomène relativement récent, datant de la fin du XIX^e siècle avec le développement des organismes de recherche et des laboratoires richement équipés. Mais, le « citoyen scientifique » n'a en fait jamais disparu, particulièrement dans les sciences comme l'archéologie, l'astronomie et l'histoire naturelle où les capacités d'observation sont aussi importantes que l'utilisation d'équipements coûteux.

Aujourd'hui, la plupart des citoyens scientifiques travaillent en tant que volontaires non rémunérés, en collaboration avec des chercheurs, dans le cadre de programmes qui leur sont adaptés. Ils en tirent un bénéfice éducatif tout en servant les intérêts scientifiques de ces derniers. La différence fondamentale entre les « citoyens scientifiques » actuels et anciens, tient à ce que leur activité est potentiellement ouverte à un plus large public, pas seulement à une minorité d'amateurs érudits. Le premier programme de science citoyenne de ce type fut sans aucun doute le *Christmas Bird Count* piloté par la société nationale Audubon aux États-Unis et qui est reconduit chaque année depuis 1900. Ainsi, 10 000 observateurs ont comptabilisé 63 millions

1 - *Observons la nature, des réseaux et des sciences pour préserver la biodiversité*, Tela Botanica, octobre 2009.

2 - Sciences participatives et biodiversité, implication du public, portée éducative et pratiques pédagogiques, *Les livrets de l'Ifreé n°2*, décembre 2010. Ifreé : Institut de formation et de recherche en éducation à l'environnement

3 - *Un réseau d'observateurs phénologiques pour la gestion du changement climatique*, Isabelle Chuine, Centre d'Ecologie Fonctionnelle et Evolutive, CNRS, Montpellier, février 2005.

4 - *La coopération, nouvelles approches*, version 1.2 du 24 décembre 2004, Jean-Michel Cornu, en chargement libre sur Internet http://www.cornu.eu.org/files/cooperation1_2.pdf

d'oiseaux dans le cadre de ce programme qui a mis en évidence, sur une période de 40 ans, une régression de 68 % de 20 espèces d'oiseaux communs ! En France, la constitution de ces savoirs publics sur la nature est relativement récente. C'est le programme STOC (Suivi temporel des oiseaux communs), initié en 1989 par le Muséum national d'histoire naturelle (MNHN) qui en est le précurseur.

Depuis, de nombreux programmes ont été lancés à l'initiative de chercheurs, de collectivités territoriales et d'associations naturalistes. L'inventaire réalisé en 2009¹ par l'association Tela Botanica et celui de l'Ifreé en 2010² en recensent plus de quarante à l'échelle nationale. Le programme Vigie-Nature du Muséum qui comprend plusieurs volets touchant de nombreux groupes taxonomiques (oiseaux, chauves-souris, flore, insectes, amphibiens) et le programme de suivi des changements climatiques par des observations phénologiques du CNRS, dénommé l'Observatoire des Saisons (ODS)³ constituent les projets les plus connus. Mais aucun d'entre eux n'a l'ampleur et ni la portée des programmes lancés dans les pays anglo-saxons. Parmi les explications avancées pour expliquer ce retard de la France dans le développement à grande échelle de programmes de sciences citoyennes, il en est une qui revient fréquemment : la France est un pays qui obéit plus à des logiques de structures qu'à des logiques individuelles. En d'autres termes, de grandes institutions comme le MNHN, le CNRS, etc. qui pilotent la recherche ont parfois des difficultés à entrer en relation avec un public qu'elles connaissent peu ou mal et le public se méfie d'institutions qu'il perçoit parfois comme trop hégémoniques. Par ailleurs, la multiplicité des structures associatives, souvent de petite taille et très localisées qui maillent le territoire ne favorise pas la participation à des programmes d'ampleur nationale. Enfin, les principes de base de la coopération qui permettent l'adhésion d'une large communauté à une œuvre commune, comme le recommande Jean-Michel Cornu dans ses travaux⁴ sont rarement respectés. Mais les choses bougent depuis quelques années, comme on peut le voir avec les programmes Vigie-Nature, ODS et autres projets proposés par diverses structures, qui trouvent des relais auprès du public en prenant appui sur des associations compétentes à l'échelle nationale.

Enjeux et contradictions des programmes de sciences citoyennes

Les enjeux liés à la perte de la biodiversité et aux changements climatiques à l'échelle mondiale constituent une opportunité pour le développement des sciences citoyennes, par leur capacité à observer des phénomènes répartis sur de vastes territoires et sur de longues échelles de temps. La collecte des informations nécessaires à ces observations implique de mobiliser un très grand nombre de « petites mains » pour obtenir des résultats significatifs. L'évolution spatio-temporelle d'une espèce en déclin ou d'une espèce envahissante ne peut pas être observée efficacement par les quelques personnes chargées de leur suivi et doit faire appel à un grand nombre d'observateurs répartis sur le territoire et se relayant sur une longue période. Il en est de même pour les changements climatiques dont les effets à court terme sont difficilement perceptibles localement alors que les conséquences à long terme peuvent être catastrophiques. Dans tous ces cas, une attention minutieuse opérée par un grand nombre d'observateurs, s'avère indispensable.

La mobilisation de ces « citoyens scientifiques » permet par ailleurs d'assurer ces tâches de suivi à de très faibles coûts dans la mesure où le travail fourni est bénévole. Dans une société marchandisée à l'extrême, cet apport de main-d'œuvre gratuite constitue une opportunité pour des pouvoirs publics de plus en plus soucieux du financement des activités marchandes que des projets d'intérêt général. Les « sciences citoyennes » contribuent ainsi, de fait, à combler le décalage important entre les ambitions affichées en matière environnementale et les moyens alloués par les pouvoirs publics à ces problématiques.

Au-delà de ces côtés utilitaires, les sciences citoyennes ont un autre aspect tout à fait intéressant à leur actif. En effet, en participant à ces programmes les citoyens impliqués acquièrent des connaissances de deux manières différentes. D'une part, leur pratique de terrain les conduit à apprendre à observer et connaître la nature qui les entoure de façon originale, souvent très éloignée de celle qu'ils ont apprise à l'école. D'autre part, le dialogue avec les scientifiques et les retours d'informations qu'ils

obtiennent des chercheurs sur leurs observations leur permet d'appréhender et de contextualiser de façon globale les évolutions de la nature qui les entoure. Cette pratique est un moyen important pour lutter contre l'analphabétisme scientifique qui tend à se développer dans nos sociétés technologiques où les objets matériels occultent les connaissances essentielles. Faut-il encore que les chercheurs jouent bien leur rôle et prennent le temps de communiquer aux citoyens les résultats de leurs travaux en termes compréhensibles par un large public.

La mobilisation d'un grand nombre de personnes, aux compétences très disparates, ne va pas sans poser quelques difficultés aux scientifiques. Peu d'entre eux sont habitués à ce mode de participation des citoyens à leurs programmes de recherche qui souvent sont articulés autour de protocoles rigoureux suivis par des personnels hautement qualifiés. Se posent alors plusieurs problèmes, comme celui de l'établissement de protocoles d'observation adaptés à un public non spécialiste ou celui de la fiabilité des données collectées par ce public. Concernant les protocoles, ils doivent être tout à la fois, extrêmement précis pour réduire les erreurs d'interprétation et les plus simples possibles à exécuter pour ne pas décourager les participants. Ces deux contraintes ne sont pas toujours conciliables, obligeant à limiter l'accès des programmes à un public plus restreint, comme c'est le cas pour les projets STOC réservés à de bons ornithologues de terrain ou Vigie-Flore à des botanistes de bon niveau. Concernant la qualité des données collectées, plusieurs axes de réflexions sont poursuivis. Les erreurs de saisie sont réduites grâce à des programmes informatiques dont l'ergonomie adaptée permet d'assister efficacement l'utilisateur, à des algorithmes vérifiant les incohérences et au traitement statistique des données qui prend en compte la dispersion des résultats liée à la disparité des observateurs. En termes de validation des données ponctuelles, deux approches sont généralement envisagées. L'une suggère un contrôle a priori des données par un expert qui valide les résultats avant publication, comme dans le cadre des inventaires réalisés par les Conservatoires botaniques nationaux, l'autre propose un contrôle a posteriori par les pairs, c'est-à-dire par les autres participants au programme qui observent de façon croisée les observations des uns et des autres.

Une contrepartie importante attendue par les participants aux programmes de science citoyenne est la réactivité des chercheurs pour restituer les résultats de synthèse qui donnent du sens à leur travail. Le principe de publier le plus tôt possible, n'est malheureusement pas toujours compatible avec le calendrier d'un thésard ou celui d'une administration. De même, la reconnaissance individuelle des participants doit se concrétiser par la citation de leur nom comme auteur des données collectées, ce qui ne va pas sans poser des problèmes lorsqu'ils sont très nombreux. La propriété des données brutes collectées dans les projets est aussi une source de difficultés dans la mesure où l'exploitation de ces données échappe à leurs auteurs. La tendance actuelle est de proposer une charte éthique aux participants au titre de laquelle ils acceptent de publier librement leurs données autorisant tout un chacun à les utiliser, y compris en dehors du programme de recherche initial. Cette mesure qui permet d'assurer une meilleure valorisation du travail des bénévoles, n'est cependant pas toujours acceptée par ceux-ci. Dans tous les cas, il importe que les hypothèses à tester ou les objectifs poursuivis par les scientifiques soient clairement compréhensibles par le public, condition indispensable à son adhésion aux projets.

Du rôle clé des associations citoyennes

D'autres programmes, non pilotés par des chercheurs, entrent également dans la catégorie des sciences citoyennes. C'est le cas par exemple des projets réalisés par des institutions ou des associations qui se fixent comme objectif de mettre en place des observatoires de la biodiversité ou qui réalisent des inventaires naturalistes. Ainsi, la cartographie des orchidées de France, initiée il y a 30 ans par la Société française d'orchidophilie, a mobilisé 3 000 observateurs et collecté 420 000 données permettant d'obtenir des cartes fiables de la répartition des espèces avec la mise en évidence des dangers d'extinction qui menacent certaines d'entre elles. Il est intéressant de noter que c'est au MNHN qu'ont été confiés le traitement de ces données et la production des cartes diffusées auprès du public⁵. Mentionnons également le

5 - *Atlas des orchidées de France*, François Dusak et Daniel Prat coordinateurs, 2010, Publications scientifiques du muséum, éditions Biotope

6 - Y a-t-il eu migration des plantes en altitude au cours du vingtième siècle ? Un inventaire fondé sur la banque française de données phytosociologiques
Sophy, 2009,
Gilles Granjouan
et Henry Brisse,
publication Tela Botanica

programme de constitution des référentiels taxonomiques et nomenclatureaux de la flore de France, initié par le réseau Tela Botanica il y a plus de dix ans et qui, aujourd'hui, servent de référence au Système d'information sur la nature et les paysages (SINP) pour structurer la connaissance sur la biodiversité à l'échelle nationale. A contrario, il est d'autres cas où des travaux importants réalisés par des scientifiques sont repris par des associations qui en assurent la valorisation et la pérennité. Citons le cas de la banque SOPHY de données phytosociologiques et de socio-écologie végétale élaborée au sein du CNRS par Henry Brisse et Patrice de Ruffray, dont le contenu a été repris par l'association Tela Botanica pour être valorisée auprès du public et intégrée dans le cadre d'autres projets de sciences citoyennes⁶.

Un dernier point important mérite d'être soulevé, celui de l'animation des programmes. En effet, il ne suffit de proclamer l'ouverture d'un nouveau programme de science citoyenne pour que les contributeurs affluent et qu'ils maintiennent leur participation dans le temps. Il importe pour cela que les techniques de communication et d'animation soient bien maîtrisées. Or ce n'est généralement pas le point fort des chercheurs que de traiter ce genre de problème et il existe de nombreuses associations disposant d'une pratique de terrain bien mieux adaptée à ces tâches.

L'alchimie de la réussite des programmes de science citoyenne provient d'une collabo-

ration équilibrée entre scientifiques et associations, l'un et l'autre ayant des caractéristiques complémentaires. Il importe notamment que cette collaboration permette aux structures chargées de l'animation d'intervenir sur la mise en place des protocoles et sur les outils, afin de les améliorer pour permettre au plus grand nombre de participer. Mais il est encore plus important pour ces structures de garder leur autonomie de parole et d'action afin de maintenir leur crédibilité auprès du public auquel elles s'adressent et de pouvoir continuer d'ouvrir des pistes de réflexion citoyennes qui leur soient propres.

Enfin, il ne faut pas oublier que si le travail des bénévoles n'est pas rémunéré, il n'en est pas de même de celui des animateurs associatifs en charge de la conduite des programmes de recherche en relation avec le public. Sans un minimum de moyens financiers, il ne leur sera pas possible de conduire à bien leur mission. Cet aspect des programmes de science citoyenne est souvent négligé, car difficile à inclure dans les demandes de financement des laboratoires auprès des ministères et de l'Europe. Ils doivent donc être relayés par d'autres partenaires financiers : collectivités territoriales, fondations privées, etc. La tâche difficile de recherches de financements incombe bien souvent aux associations chargées de l'animation, mais qui malheureusement n'en n'ont pas toujours les capacités, le temps ou les moyens...

D.M.

Daniel MATHIEU
Président de Tela
Botanica
Mél : dmathieu@
tela-botanica.org
www.tela-
botanica.org

Résumé

Cartographie de la flore, suivi des oiseaux communs et des événements saisonniers, observatoire des papillons de jardins... Les changements liés à l'évolution du climat, et plus généralement à l'action de l'homme sur l'environnement sont multiples et complexes. Les chercheurs ne peuvent plus en appréhender seuls la globalité, d'où leur appel aux citoyens pour observer la nature. Mais comment s'articulent dans tous les cas ces relations entre citoyens et chercheurs ? Questions auxquelles nous allons essayer d'apporter un éclairage à la lumière de notre pratique

Summary

Observing nature: an issue for "citizen-oriented science"

Mapping flower distribution, monitoring common birds and events by season, an observatory of garden butterflies... The changes linked to the evolution in climate and, more generally, to the impact of mankind on the environment are manifold and complex. Research scientists on their own can no longer acquire an overall understanding of such factors; hence their request to the general public to record their observations of nature. But in all the cases involved, how are the relations between researchers and ordinary citizens to be governed? A question on which we will try to shed some light as a result of our way of working.

Les réseaux d'observation du Département de la Santé des forêts

par Bernard BOUTTE

Avoir un maximum d'informations sur les évolutions en cours permettra de mieux adapter les forêts aux changements climatiques. L'observation est indispensable et devient un acte de gestion en soi. Dans cet article, l'auteur nous décrit les différents réseaux de suivi de l'état de santé des forêts en France et, plus particulièrement, dans la région méditerranéenne. L'ensemble du dispositif permet un suivi à plusieurs échelles de temps et d'espace.

Le dispositif de surveillance de la santé des forêts en France

Le dispositif de surveillance de la santé des forêts en France s'appuie sur trois réseaux :

– un réseau de 220 correspondants observateurs (CO) du Département de la Santé des forêts (service du ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation, de la Ruralité et de l'Aménagement du territoire), répartis dans les services forestiers (services de l'Etat chargés des forêts, Office national des forêts, Centres régionaux de la propriété forestière...). Ils collectent l'ensemble des informations de terrain nécessaires à l'établissement de l'état de la santé des forêts et assurent une mission de diagnostic-conseil auprès des propriétaires et des gestionnaires de leur territoire d'action ;

– deux réseaux de placettes permanentes : le Réseau systématique de suivi des dommages forestiers (RSSDF), mis en place en 1989, géré par le Département de la Santé des forêts et le Réseau national de suivi à long terme des écosystèmes forestiers (RENECOFOR), mis en place en 1992, géré par l'Office national des forêts (ONF).

1 - DRAAF PACA :
Direction régionale
de l'Agriculture,
de l'Alimentation
et de la forêts
de Provence-Alpes-Côte
d'Azur

2 - ANSES :
Agence nationale
de sécurité sanitaire
de l'alimentation,
de l'environnement
et du travail
INRA :
Institut national de la
recherche agronomique

Le réseau de correspondants observateurs en région méditerranéenne

La forêt méditerranéenne est incluse dans le territoire administratif du pôle Sud-Est de la Santé des forêts (DRAAF PACA ¹).

Les 28 correspondants-observateurs de la région méditerranéenne (régions PACA, Corse et Languedoc-Roussillon) consacrent 30 à 50 jours/an à leur activité phytosanitaire en forêt (15 à 20 % du temps). Ils bénéficient de formations (regroupement annuel, formation de base, formations spécifiques...), d'une durée annuelle de 5 jours environ, organisées par le pôle interrégional.

Ces correspondants-observateurs ont une double mission :

- la surveillance de la santé des peuplements forestiers sur leur territoire d'action et transmission des informations, par voie télématique, au pôle interrégional à l'aide de fiches simplifiées d'observation, de notations de dégâts selon des protocoles spécifiques ou de données recueillies sur des placettes permanentes...

- le diagnostic, l'analyse de risque et le conseil en matière phytosanitaire auprès

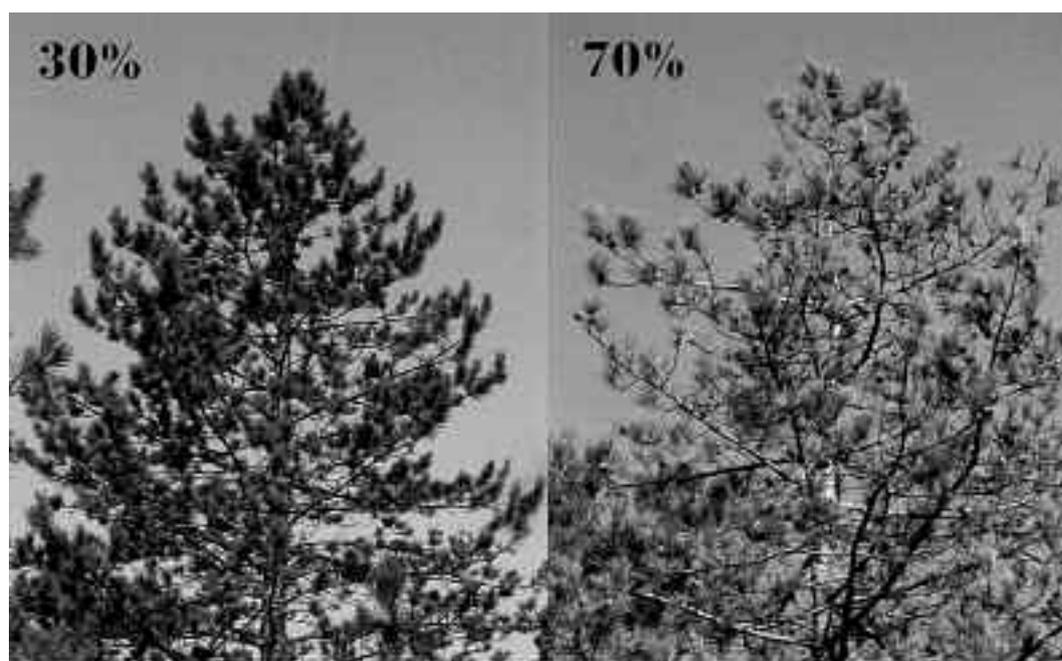
des propriétaires et des gestionnaires de forêts. Pour le diagnostic d'échantillons, les correspondants-observateurs bénéficient de l'appui du pôle interrégional qui analyse ou fait analyser les échantillons à des laboratoires spécialisés (ANSES, INRA...)².

Le réseau systématique de suivi des dommages forestiers

Le réseau systématique de suivi des dommages forestiers (ex "réseau européen") a été mis en place en 1989. Il est géré par le Département de la Santé des forêts depuis cette date.

Ce réseau est formé de 510 placettes de 20 arbres (10 200 arbres) au niveau national (101 placettes en région méditerranéenne), installées selon un maillage de 16 km par 16 km. Il constitue la partie française d'un ensemble de placettes permanentes de suivi installées au niveau des pays de l'Union européenne.

Il a pour objectif principal d'évaluer et de suivre l'état sanitaire des forêts au cours du temps.



Pinus nigra Arnold subsp. *nigra*

Pinus nigra Arnold subsp. *nigra*

Photos 1 et 2 :
Deux exemples
de houppier (*Pinus nigra*)
avec un déficit foliaire
de 30 % (à gauche)
et 70 % (à droite)

La notation de 20 arbres dominants sur chaque placette (ainsi que le remplacement des arbres exploités, dominés, cassés...) est effectuée en été (du 1^{er} juillet au 31 août), par une équipe de deux notateurs dont un correspondant-observateur du Département de la Santé des forêts afin de bénéficier d'une bonne compétence phytosanitaire.

Chaque arbre fait l'objet d'une notation détaillée des symptômes et des causes de dommages pouvant affecter sa santé : mortalité de branches, coloration anormale, ainsi que les autres symptômes (chancre, blessure...) ou causes de dommages (chenilles défoliatrices, pathogènes...). Pour chacun de ces critères, l'organe affecté est décrit et une estimation qualitative d'importance en classe de 10 % est donnée.

Le déficit foliaire par rapport à un arbre de référence est noté en classe de 5 %, à la fin de la phase d'observation de l'arbre – échantillon (Cf. Photos 1 et 2).

L'ensemble des observations, analyses et résultats du "réseau de suivi des dommages forestiers" sont disponibles sur le site Internet du ministère de l'Agriculture : <http://agriculture.gouv.fr/sante-des-forets>.

Le réseau national de suivi à long terme des écosystèmes forestiers

Le réseau RENECOFOR a été créé par l'Office national des forêts (ONF) en 1992 afin de compléter le système de surveillance sanitaire des forêts françaises. Il constitue la partie française d'un ensemble de placettes permanentes de suivi des écosystèmes forestiers installées dans 34 pays européens.

L'organisation de ce réseau est coordonnée par l'ONF en collaboration avec divers partenaires : INRA², CNRS³, universités, bureaux d'études... pour les opérations très spécialisées. L'ensemble des activités est supervisé par un groupe français d'experts et au niveau européen par un comité scientifique.

L'objectif principal du réseau RENECOFOR est de détecter d'éventuels changements à long terme dans le fonctionnement d'une grande variété d'écosystèmes et de déterminer les raisons de ces changements. Ces écosystèmes ont été sélectionnés pour être représentatifs de la région dans laquelle ils se trouvent. 102 placettes sont implantées en France, dont 10 en région méditerranéenne

(placette de 2 hectares, dont 0,5 hectare clôturé).

L'ensemble des données, observations et analyses est stocké dans une base de données centrale. Les résultats sont publiés dans la série RENECOFOR, consultables sur le site de l'Office national des forêts : <http://www.onf.fr/renecofor/>.

Des outils de surveillance complémentaires

Les trois dispositifs principaux ci-dessus sont complétés par :

– les points de l'Inventaire forestier national : sur lesquelles sont menées des observations de problèmes "pérennes" : mortalité de branches, blessures sur tronc, gélivures, gui, dorge du sapin, pourriture du cœur...

– le réseau de placettes "processionnaire du pin" : 500 placettes (150 en région méditerranéenne) de 0,25 ha, sur lesquelles sont notés, entre janvier et mars, le nombre et la taille des nids d'hiver et la défoliation observée,

– des informations collectées au niveau du gestionnaire : volumes de bois récoltés suite à des attaques de scolytes, volumes de bois déperissants...,

– la télédétection : qui offre des perspectives intéressantes, utilisée actuellement à titre expérimental dans des projets spécifiques.

Objectifs et stratégie de surveillance

Les objectifs du dispositif de surveillance

Les trois principaux objectifs du dispositif mis en place sont :

– la surveillance permanente de la forêt française pour tous les problèmes entomologiques, pathologiques ou d'origine abiotique ou complexe (déperissements) ;

– le suivi à long terme des écosystèmes forestiers et l'analyse des risques liés aux facteurs naturels, aux modes de gestion et aux perturbations dues aux activités humaines ;

3 - CNRS : Centre nationale de la recherche scientifique

– le suivi de l'impact des changements globaux observés depuis plusieurs décennies et en particulier le changement climatique.

Une stratégie qui se décline selon trois axes

– **Le suivi spécifique des principaux problèmes sanitaires** : pour lesquels une information quantitative (éventuellement cartographique), annuelle, est demandée afin notamment d'évaluer l'impact des changements climatiques.

Les stratégies de suivi spécifique ont été préparées en tenant compte des données collectées de 1989 à 2006, des informations issues du réseau de suivi des dommages forestiers et des informations fournies par l'Inventaire forestier national.

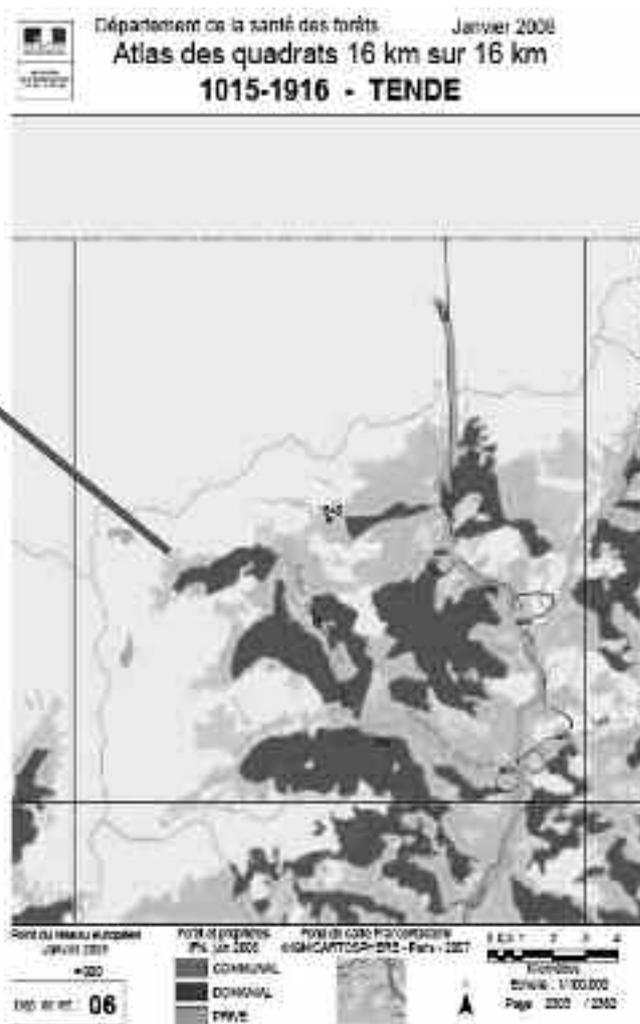
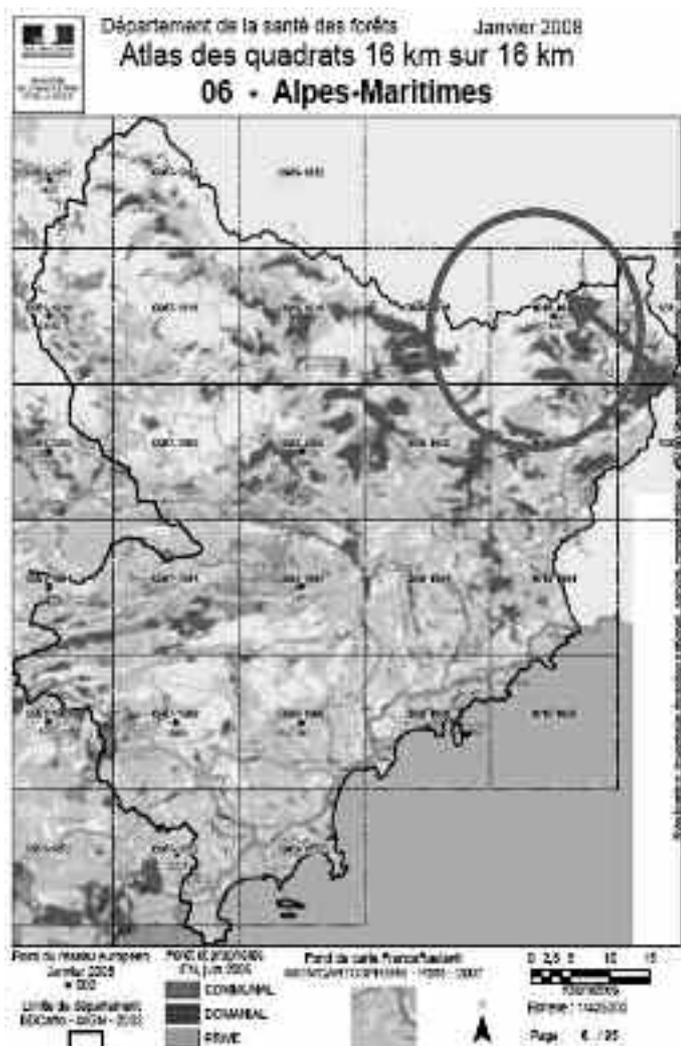
Ce suivi spécifique se décline sous forme de dispositifs adaptés à chaque problème : la processionnaire du pin, les défoliateurs des chênes, la réussite des plantations de l'an-née, le typographe de l'épicéa, les dépérissements...

– **La surveillance du territoire** : concerne la détection de la présence d'organismes envahissants (notamment dans le cadre des plans de surveillance des organismes de quarantaine) : cynips du châtaignier, chancre à *Fusarium circinatum*... ou l'évaluation de la situation phytosanitaire d'essences introduites (Eucalyptus...).

Cette surveillance s'effectue à partir de prospections dirigées en fonction des régions, des essences et des organismes recherchés.

– **La veille sanitaire** : concerne tous les autres problèmes sanitaires, c'est-à-dire tout

Fig. 1 :
Découpage en quadrats
du département des
Alpes-Maritimes
(carte 1, à gauche),
détail du quadrat de
Tende (carte 2, à droite)



dégât, symptôme alarmant ou indice de présence d'un problème, identifié ou non, laissant présager des dommages à venir. Ces problèmes sont enregistrés sous forme d'une fiche simplifiée afin de poursuivre l'inventaire des dommages phytosanitaires sur le territoire.

Un nouvel outil d'observation : le quadrat de 16 km x 16 km

L'implantation des placettes systématiques de suivi des dommages forestiers sur un maillage Lambert de 16 km par 16 km et celle des points d'inventaires de l'IFN sur un quadrillage Lambert kilométrique ont conduit à utiliser des quadrats de 16 km par 16 km (quadrats = carrés centrés sur la grille d'implantation des placettes du réseau systématique) comme dispositif de surveillance, de collecte et de présentation des observations.

Au sein de ces quadrats, les types de propriété sont connues ainsi que les surfaces approximatives des différentes essences.

Chaque correspondant-observateur dispose d'un atlas départemental des quadrats et du détail de chaque quadrat (Cf. Fig. 1).

Sur ces quadrats, les correspondants-observateurs relèvent des informations telles que les surfaces de chênes défoliés à plus de 50 %, le pourcentage de lisières défoliées par la processionnaire du pin, les surfaces de mélèze d'Europe défoliées par la tordeuse grise et réparties selon quatre classes de défoliations... (Cf. § suivant).

La carte des quadrats permet également de présenter des résultats en terme de présence-absence d'un problème phytosanitaire.

Quelques illustrations

Quelques exemples de cartographie, graphiques ... issus des observations effectuées depuis la mise en place de la nouvelle stratégie de surveillance de la Santé des forêts en PACA sont présentés ci-dessous.



Fig. 2 : Sur les quadrats gris, le qui n'a pas été observé par l'IFN ; sur les quadrats noirs, il a été observé sur une placette au moins. Les triangles correspondent aux fiches d'observation DSF

Photo 3 : Sapin güté dans la région du Haut-Var
Photo DA



Le gui sur le sapin pectiné

La carte de la figure 2 présente une synthèse des observations (2008-2010) du gui sur les placettes de sapin pectiné de l'Inventaire forestier national (IFN) et les fiches d'observation des correspondants-observateurs du DSF.

Après un passage complet sur toutes les placettes de l'IFN, une carte exhaustive de la présence du gui pourra être éditée.

Résultats des observations du réseau systématique de suivi des dommages forestiers

La figure 3 permet d'illustrer les évolutions du déficit foliaire du pin noir d'Autriche dans trois régions naturelles : les plaines du Nord-Est, les Alpes et la région méditerranéenne. Le pic observé en 2008 en région méditerranéenne correspond au fort déficit observé cette année-là, suite à la période de sécheresse 2003-2007 ; de nombreux dépérissements ou mortalités ont été observés, par ailleurs, en 2008 sur cette essence.

La figure 4 illustre l'évolution du déficit foliaire pour deux essences en zone méditerranéenne (chêne pubescent et chêne vert) de 1997 à 2009. On observe une dégradation progressive depuis l'année 1999 (21 % de déficit foliaire) à 2009 (34 % de déficit foliaire) soit 15 % en 10 ans.

Cartographie de la présence du cynips du châtaignier dans le Sud-Est

Le cynips du châtaignier est un insecte hyménoptère qui entraîne la création de galles sur les feuilles, les fleurs... Ce ravageur est préjudiciable à la production de châtaignes : il peut entraîner une perte de production de 50 à 70 % par an.

Seulement présent dans les Alpes-Maritimes jusqu'en 2009, il a "explosé" dans le Sud-Est en 2010. Cette recrudescence a nécessité la mise en place d'une recherche systématique dans tous les quadrats où est présent le châtaignier en forêt.

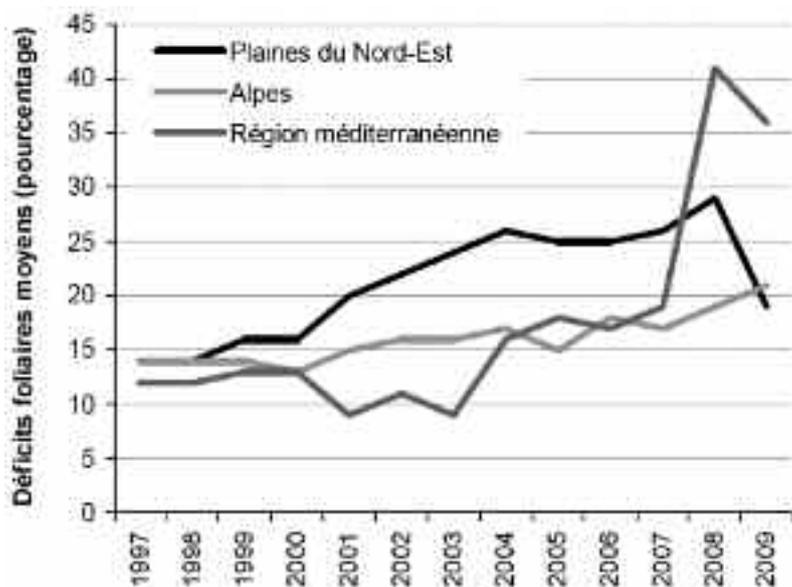
Le résultat de cette prospection est présenté dans la figure 5.

Conclusion

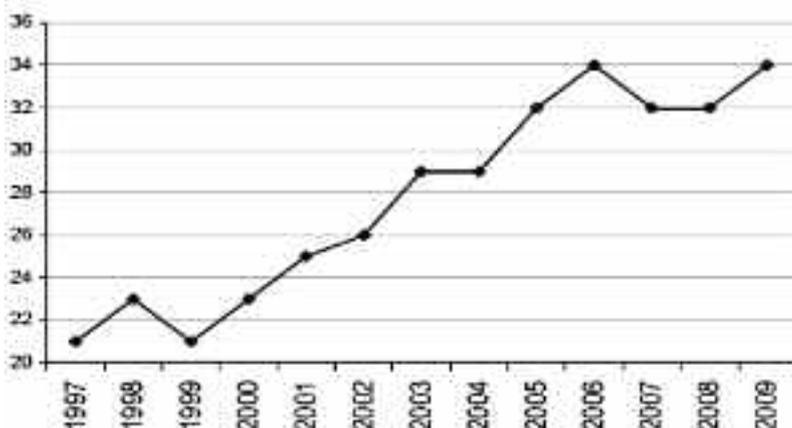
Le dispositif de surveillance de la santé des forêts en France est organisé en trois niveaux complémentaires de manière à observer l'évolution de l'état sanitaire des peuplements forestiers à plusieurs échelles de temps et d'espace : sur le long terme, au niveau des écosystèmes forestiers (réseau RENECOFOR) et au niveau de grandes régions écologiques pour les principales essences forestières (réseau de suivi des dommages forestiers) et sur le moyen terme,

Fig. 3 (ci-dessous) :
Déficit foliaire du pin noir (effectif > 50)

Fig. 4 (en bas) :
Evolution des déficits foliaires moyens des chênaies méditerranéennes



Chênaies méditerranéennes
Départements : 13, 66, 11, 34, 30, 83, 84, 04, 07, 2A, 2B



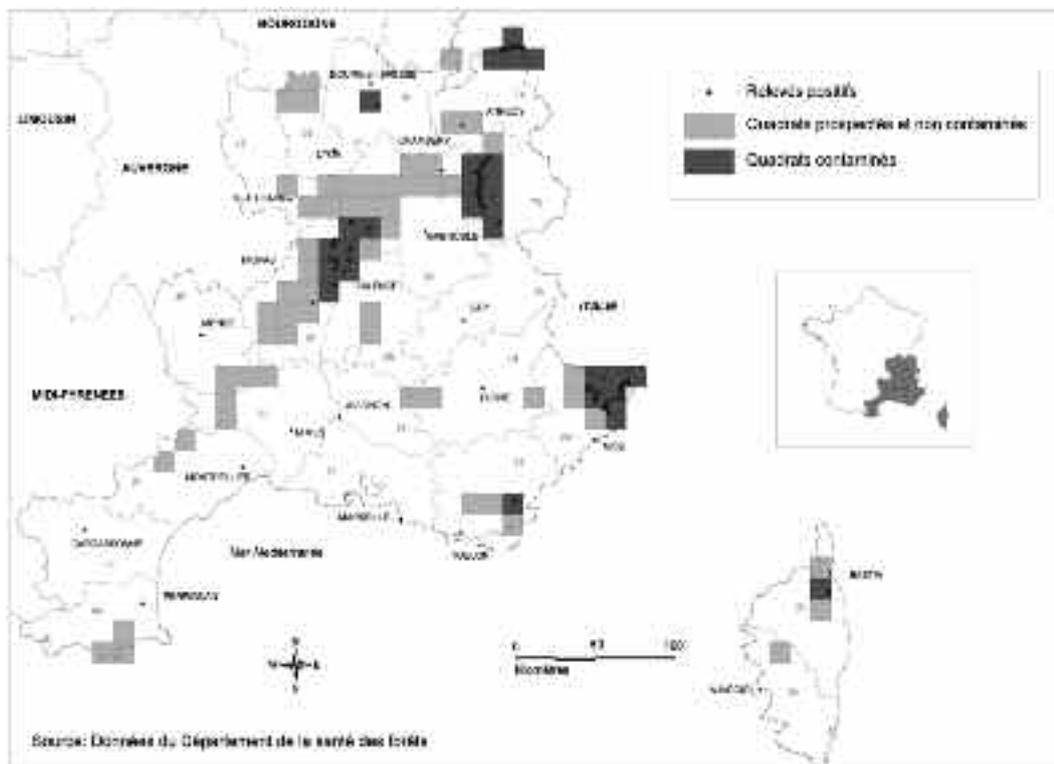
au niveau local, grâce aux observations des correspondants-observateurs du Département de la Santé des forêts.

La nouvelle stratégie de surveillance mise en place en 2007 par le Département de la Santé des Forêts avec ses correspondants-observateurs a pour but de répondre aux attentes des partenaires forestiers : mettre à disposition des données quantitatives et cartographiques pour les principaux ravageurs ou pathogènes afin d'évaluer, de manière objective, l'impact du changement global sur les peuplements forestiers français ; alerter au plus tôt les professionnels et les administrations en cas d'introduction d'un organisme envahissant sur le territoire national et poursuivre l'inventaire des dommages phytosanitaires et des agents responsables.



Photo 4 :
Bernard Boutte
décortiquant une écorce
de pin maritime
Photo DSF

B.B.



Bernard BOUTTE
Pôle Sud Est de la
Santé des Forêts
DRAAF PACA/SRAL
Quartier Cantarel
BP 95
84143 Montfavet
Cedex
Tél. : 04 90 81 11 20
Fax : 04 90 81 11 29
Courriel :
dsf-se.draaf-paca@
agriculture.gouv.fr

Fig. 5 :
Résultats
de la surveillance
du cynips du châtaignier
en forêt en 2010
par le Département
de la Santé des forêts

Résumé

Le dispositif de surveillance de la santé des forêts en France s'appuie sur trois réseaux complémentaires : le réseau national de suivi à long terme des écosystèmes forestiers (RENECOFOR), le réseau systématique de suivi des dommages forestiers (RSSDF) et le réseau de correspondants-observateurs du Département de la Santé des Forêts (DSF). Les objectifs et la stratégie de surveillance de la santé des forêts mise en place en 2007, pour suivre notamment l'impact des changements globaux sur l'état sanitaire des forêts, sont ensuite abordés. En conclusion, des illustrations (cartes, graphiques...) des résultats d'observations de divers parasites depuis 2007 sont proposées.

Summary

The observation networks of the Department of Forest Health

The surveillance arrangements for monitoring forest health in France are based on three complementary networks: the national network for the long-term monitoring of forest ecosystems (RENECOFOR), the systematic network for monitoring damage to forests (RSSDF) and the Department of Forest Health (DSF)'s network of correspondents-observers. Then, the article considers the objectives and strategy of forest health monitoring as set up in 2007 to follow in particular the effect of global changes on the state of health of forests. In conclusion, illustrations (maps, graphs) are given of the results of observations of various parasites since 2007.

Riassunto

Le reti di osservazione del Dipartimento di Sanità delle foreste

Il dispositivo di sorveglianza della sanità delle foreste in Francia si appoggia su tre reti complementari : la rete nazionale di seguito a lungo termine degli ecosistemi forestali (RENECOFOR), la rete sistematica di seguito dei danni forestali (RSSDF) e la rete di corrispondenti-osservatori del Dipartimento della Sanità delle foreste (DSF). Sono abordati dopo gli obiettivi e la strategia di sorveglianza della sanità delle foreste messa in posto nel 2007, per seguire in particolare l'impatto dei cambiamenti globali sullo stato sanitario delle foreste. In conclusione, le illustrazioni (mappe, grafici...) dei risultati di osservazioni di vari parassiti dal 2007 sono proposti.

L'O3HP, Oak Observatory at OHP

Un site expérimental pour l'étude du fonctionnement et de la biodiversité de la chênaie pubescente face aux changements climatiques

par Thierry GAUQUELIN, Michel BOER, Virginie BALDY, Catherine FERNANDEZ, Nicolas MONTES, Mathieu SANTONJA, Jean-Philippe ORTS et Ilja REITER

Le site expérimental de l'Observatoire de Haute-Provence est l'un des trois sites d'expérimentation de la région méditerranéenne française, avec celui de Puéchabon dans l'Hérault et celui de Fontblanche dans les Bouches-du-Rhône. Il s'attache tout particulièrement à mieux comprendre et suivre l'évolution de l'écosystème de la chênaie pubescente soumis au changement climatique.

Le contexte

Comprendre le fonctionnement des écosystèmes et prévoir leur évolution sont des enjeux stratégiques en particulier dans le cadre des changements globaux et du développement durable. Cette connaissance présente des intérêts fondamentaux et finalisés majeurs, l'homme agissant de manière prépondérante sur les écosystèmes.

Les écosystèmes méditerranéens, et notamment les écosystèmes forestiers méditerranéens, occupent une place tout à fait particulière dans cette problématique. En effet, déjà soumis régulièrement à des stress climatiques (e.g. sécheresse estivale, événements pluviométriques de forte intensité) et à des perturbations répétées (e.g. feux, surpâturage), ces écosystèmes s'avèrent particulièrement sensibles aux changements climatiques, alors même qu'ils recèlent une biodiversité remarquable, le bassin méditerranéen étant considéré comme l'un des 34 points chauds (*hot-spots*) de biodiversité de la planète. En raison du réchauffement climatique rapide, de la diminution de la pluviométrie au printemps et en été et de l'augmentation de la variabilité du climat (SCHAR *et al.*, 2004), les prévisions pour le XXI^e siècle dans le bassin méditerranéen (HESSELBJERG-CHRISTIANSEN et HEWITSON, 2007) laissent

- 1 - CEFÉ : Centre d'écologie fonctionnelle et évolutive
- 2 - INRA : Institut national de la recherche agronomique
- 3 - IMEP : Institut méditerranéen d'écologie et de paléoécologie

entrevoir que les successions d'années sèches devraient devenir plus fréquentes dans les décennies à venir (BENISTON et DIAZ, 2004). Ces périodes de faible disponibilité en eau et de températures élevées limitant les processus physiologiques seront d'une importance majeure, limitant l'activité photosynthétique des arbres et leur croissance. Étant donné que la plupart des sols méditerranéens sont érodés (BUTZER, 2005), leur capacité de rétention en eau est souvent faible, ce qui peut prolonger les périodes de limitation en eau et augmenter ainsi l'impact des épisodes de sécheresse. La survie de l'arbre peut être mise en jeu dans le cas d'épuisement en eau du sol (LANDMANN *et al.*, 2003 ; BRÉDA *et al.*, 2006).

Si un certain nombre de simulations ont permis, par exemple, d'appréhender les modifications d'aire de taxons liées aux changements climatiques annoncés (par exemple, la remontée vers le nord de l'Hexagone du Chêne vert), encore trop peu de travaux ont concerné les modifications fonctionnelles des écosystèmes, comme, par exemple, leurs performances photosynthétiques ou encore l'efficacité de leur cycle biogéochimique, alors même que ce sont des éléments clés de leur pérennité. Ce sont aussi des données essentielles pour comprendre leur contribution au cycle du carbone et leur rôle actuel ou à venir en tant que puits ou source de carbone.

Ce type d'approche fonctionnelle nécessite des approches expérimentales lourdes intégrant des manipulations de l'écosystème ; le CEFÉ¹ (UMR CNRS 5175) de Montpellier a été précurseur dans le domaine avec l'installation, il y a 20 ans, du site de Puéchabon (Hérault) où est étudié le fonctionnement de la chênaie verte ; a suivi la mise en place du site de Fontblanche (Bouches-du-Rhône), piloté par l'INRA² et dédié à l'étude du Pin d'Alep.

Dans cette optique de compréhension des impacts du changement climatique sur le fonctionnement des écosystèmes méditerranéens, nous avons donc choisi :

- de nous intéresser au troisième type d'écosystème forestier majeur de la région méditerranéenne française, à savoir la chênaie pubescente ;
- de développer une approche expérimentale multi-approches, à court terme et en faisant appel à un environnement scientifique de haute technicité.

Seront ainsi investigués les trois taxons majeurs : *Quercus pubescens* (Chêne pubescent), *Quercus ilex* (Chêne vert) et *Pinus halepensis* (Pin d'Alep), représentatifs des trois types fonctionnels les plus répandus chez les espèces forestières de la région méditerranéenne : les espèces malacophylles à feuillage caduc (plus précisément marcescentes pour le Chêne pubescent) et les espèces sclérophylles sempervirentes feuillues ou résineuses (pour le Chêne vert et le Pin d'Alep respectivement). Elles présentent aussi des stratégies contrastées face à la sécheresse. *Q. pubescens* et *Q. ilex* (stratégie de résistance) tolèrent la sécheresse et se caractérisent en partie par une moindre conductance des stomates et un potentiel hydrique plus faible en conditions de sécheresse. *P. halepensis* (stratégie d'évitement) s'adapte à la sécheresse en perdant partiellement son feuillage pendant la saison sèche et en fermant les stomates pour éviter la perte d'eau (MARTINEZ-FERRI *et al.*, 2000 ; NARDINI et PITT, 1999 ; BAQUEDANO & CASTILLO, 2007). Ces trois sites permettront donc de comprendre les différentes stratégies mises en place par ces trois espèces face aux contraintes hydriques.

Le Chêne pubescent s'avère être dans ce cadre un modèle de choix incontournable du fait de son occurrence dans des situations écologiques au carrefour de plusieurs influences climatiques. En effet, sa position en tant qu'espèce méditerranéenne climatique fait ainsi encore débat (JALUT *et al.*, 2000) du fait notamment de son aire de répartition assez large et de sa préférence actuelle pour les sols relativement développés, alors même que sa résistance aux conditions arides a été soulignée (NARDINI et PITT, 1999). Les études le concernant restent cependant trop parcellaires et méritent d'être intensifiées et développées, afin notamment de comprendre sa place passée, actuelle et future dans le domaine méditerranéen et aux limites de celui-ci (PONS et QUÉZEL, 1998).

Pour compléter les connaissances du fonctionnement des formations ligneuses méditerranéennes sous contrainte hydrique, une troisième plateforme instrumentée comportant également un système d'exclusion de pluie sera mise en place courant 2011 par l'équipe Diversité fonctionnelle des communautés végétales de l'IMEP³ dans un écosystème de garrigue, formation arbustive dominante en Région Provence-Alpes-Côte

d'Azur. Ce site expérimental correspond aux besoins du programme ANR CLIMED (appel d'offre Changements environnementaux planétaires) en partenariat avec le CEFÉ de Montpellier (porteur du projet), l'ENSAIA⁴ de Nancy, et l'OHP.

L'O3HP

Dans cette optique, ce vaste programme s'appuie sur l'installation in situ d'une instrumentation innovante et d'une plateforme expérimentale développées sur le site de l'Observatoire de Haute-Provence à St-Michel-l'Observatoire, l'O3HP⁵ (*Oak Observatory at the OHP*).

Le site « Observatoire de Haute Provence » a été choisi, en dehors de l'environnement scientifique et technique particulièrement favorable qu'il offre, d'une part, bien sûr, pour la présence d'une forêt de Chêne pubescent représentative et d'autre part pour sa position bioclimatique particulière.

De plus, la Chênaie de l'OHP présente la particularité de ne pas avoir été exploitée depuis la fin de la dernière guerre, constituant ainsi un exemple de ce que l'on appelle une « forêt ancienne ou subnaturelle ».

Ces forêts patrimoniales, résultats de siècles d'anthropisation, s'avèrent potentiellement très sensibles aux changements globaux, notamment climatiques, qui affectent déjà la région méditerranéenne et vont se manifester avec plus d'intensité dans les décennies à venir. Ainsi l'aridification prévisible ou déjà en cours est susceptible de conduire à une réduction des surfaces occupées par ce Chêne blanc, modifiant ainsi les paysages actuels et leur forte identité.

D'autre part, la Chênaie de l'OHP se situe bioclimatiquement dans l'étage supraméditerranéen qui correspond encore à un climat méditerranéen mais dont la période de sécheresse estivale est réduite à un mois seulement.

Une réduction des précipitations naturelle ou artificielle sera à même de renforcer le caractère méditerranéen en augmentant la période sèche (jusqu'à 3 mois) et donc le stress climatique estival, favorisant ainsi potentiellement le Chêne vert. On peut donc s'attendre à court terme à des modifications rapides du fonctionnement d'un écosystème caractéristique de conditions mésophiles tel que la chênaie pubescente.

Ce site entre cependant en synergie avec les deux autres plateformes expérimentales déjà installées en région méditerranéenne et la troisième en cours d'installation.

L'O3HP associe le CNRS et les Universités de Marseille au travers des laboratoires de recherches IMEP, OHP, CEREGE⁶, et de la fédération de recherche ECCOREV. Il bénéficie du soutien de la Région PACA et du Département des Alpes-de-Haute-Provence.

Il est organisé autour :

– d'un système de passerelles permettant d'accéder aisément à la canopée (Cf. Photos 1) ;

4 - ENSAIA : Ecole nationale supérieure d'agronomie et des industries alimentaires

5 - <http://www.obs-hp.fr/O3HP/O3HPMain.html>

6 - CEREGE : Centre européen de recherche et d'enseignement des géosciences de l'environnement



Photos 1 : Système de passerelles mis en place à l'O3HP : vue de la passerelle supérieure située à 3,5 m du sol (photo ci-dessus) et de la passerelle inférieure située à 80 cm du sol (photo ci-contre).

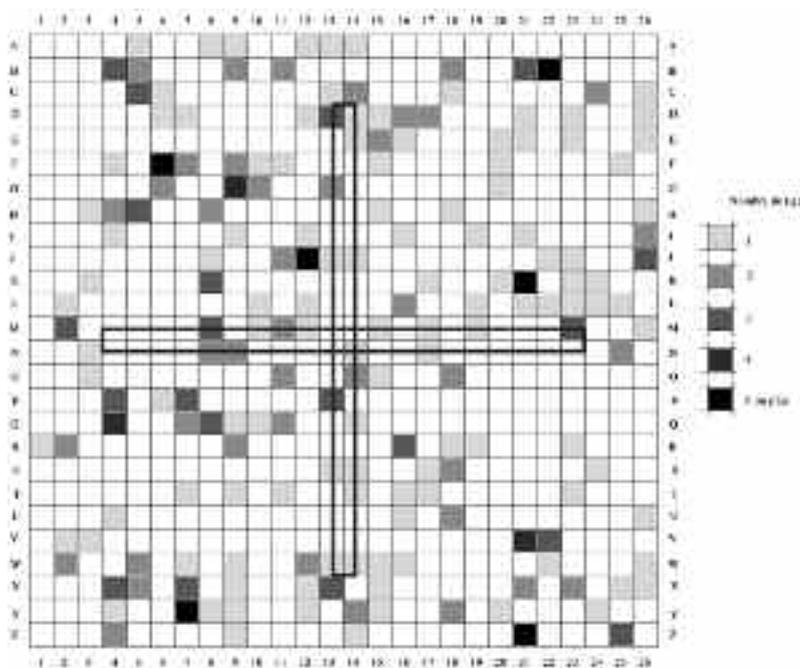


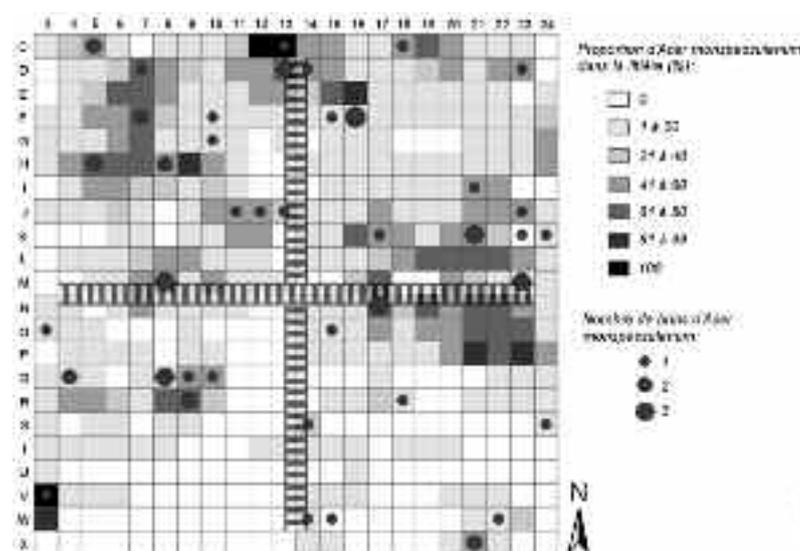
Fig. 1 :
Cartographie des tiges
de *Quercus pubescens*
dans la parcelle

- d'un système d'exclusion de pluies qui permet de reconstituer sur une partie du dispositif une baisse des précipitations de l'ordre de 30%, telle que prévue par les modèles climatiques ;

- d'un ensemble de capteurs permettant de cerner au plus près le microclimat existant au cœur de la forêt.

Fig. 2 :
Pourcentage
de litière d'Erable
(*Acer monspessulanum*)
dans la parcelle

Le fonctionnement écosystémique de cette parcelle avec exclusion partielle de la pluie sera comparé à celui de la parcelle témoin et il est prévu dans l'avenir de le comparer avec celui d'une parcelle au niveau de laquelle un



système d'irrigation permettra de reconstituer les précipitations moyennes des 40 dernières années, permettant ainsi de minimiser l'impact d'années très particulières, s'écartant trop de la moyenne.

Ainsi est prévu l'enregistrement en continu des paramètres suivants :

- température canopée - strate arbustive et herbacée - litière (horizon OL) - horizon A - horizon minéral ; mesure en continu (pas de temps 10 min) ;

- humidité : humidité relative pour canopée - strate arbustive et herbacée ; humidité pondérale litière (horizon OL) - horizon A - horizon minéral ; mesure en continu ; pas de temps 10 min) (pour température et humidité, réseau de 100-150 capteurs prospectant les 2000 m² de forêt étudiés ; centralisation et transmission en temps réel des données) ;

- accroissement radial des arbres (pas de temps variable) à l'aide de quatre dispositifs automatisés.

A ces mesures s'ajoutent celles des précipitations incidentes, des eaux d'égouttement et d'écoulement (mesures quantitatives et qualitatives par collectes manuelles hebdomadaires), de la décomposition des litières (mésocosmes *in situ*) et du suivi des communautés microbiennes de la phyllosphère et du sol.

Un travail préliminaire en cours permet de proposer une caractérisation fine de la parcelle, en cartographiant par exemple le nombre de tiges de Chênes pour chacune des cépées (Cf. Fig. 1) ou encore les pourcentages de litières au sol des espèces dominantes (Cf. Fig. 2)

D'une manière plus générale, pour la première fois concernant ce type de chênaies, il sera donc possible, grâce aux passerelles installées à demeure dans le houppier des arbres, d'investiguer en continu au niveau de la canopée dont on connaît aujourd'hui, grâce notamment aux travaux du radeau des cimes, toute l'importance tant au niveau des échanges avec l'atmosphère qu'au niveau de la biodiversité qu'elle abrite.

Cet observatoire constitue ainsi un véritable outil de terrain à fort potentiel scientifique, constituant une plateforme mutualisée entre différents laboratoires et largement ouvert à la communauté scientifique. Il permettra d'appréhender diverses recherches interdisciplinaires concernant notamment l'impact de l'Homme sur son milieu et la dynamique d'un écosystème soumis aux changements climatiques globaux.

Ce programme associe déjà des physiciens de l'atmosphère, des astrophysiciens, des physiologistes et des écologues, avec des interactions entre personnels de l'OHP et, pour l'instant, de l'IMEP. Ces interactions vont permettre une optimisation de la gestion des bases de données en collaborant avec des chercheurs et ingénieurs de l'OHP, qui possèdent une très grande expérience dans la conduite de projets en astrophysique et en astronomie de grande envergure incluant la gestion de très nombreuses bases de données.

L'une des originalités du montage scientifique et administratif réside donc dans la forte implication des personnels de l'OHP, à la fois dans la conception des dispositifs et dans l'acquisition des données, et dans la recherche ; personnels dont le savoir-faire technique constitue un atout considérable pour la réussite de cette plateforme. Se met donc en place une véritable synergie entre l'OHP et les laboratoires d'Ecologie et d'Environnement concernés de manière à offrir un outil mutualisé performant.

Sur ce site, il s'agit de comprendre l'impact des changements climatiques sur :

- la phénologie des espèces dominantes. Suivre la phénologie, dans le cadre plus général d'un suivi national voire international du comportement des espèces forestières face aux changements climatiques, doit s'envisager sur le moyen ou long terme ; l'idée est aussi de pouvoir « automatiser » par l'utilisation de capteurs appropriés cette approche phénologique ;

- la productivité relative des deux essences forestières présentes sur le site (Chêne pubescent et Erable de Montpellier) et leur stratégie d'allocation de biomasse notamment entre la partie fonctionnelle (les feuilles) et structurale (les organes ligneux) ;

- le fonctionnement photosynthétique et les échanges gazeux des espèces végétales structurantes, processus clés du fonctionnement des végétaux, afin d'estimer la réponse écophysiological des espèces, et particulièrement du Chêne pubescent, à un stress hydrique croissant ;

- les émissions de Composés organiques volatils (COV) par les plantes ; réponse des végétaux à des stress croissants/pollution ;

- les cycles biogéochimiques, en particulier le cycle du carbone et le comportement de l'écosystème en terme de puits ou source de carbone ;

La décomposition des litières, un processus clé étudié à l'O3HP

La décomposition des litières est un processus clé du fonctionnement des écosystèmes. Le taux de décomposition est sous la dépendance de différents facteurs, principalement les conditions environnementales (notamment la disponibilité en eau) et la composition biochimique des litières qui arrivent au sol, résultant du mélange d'espèces végétales en présence.

Nous pouvons tester ces deux facteurs à l'O3HP, avec comme hypothèse que le changement climatique (à travers la baisse de précipitations) affectera l'effet de la composition biochimique de la litière (à travers le mélange d'espèces végétales) sur le processus de décomposition. L'approche expérimentale consiste à :

- mettre une certaine quantité de litière d'un mélange d'espèces végétales présentes sur le site dans des mésocosmes (photo ci-dessous),
- placer ces mésocosmes sur les parcelles avec exclusion de pluie et les parcelles témoins,

- prélever des mésocosmes tous les 2 mois pour quantifier la masse de litière restante qu'ils contiennent, analyser les composés biochimiques encore présents et suivre l'évolution de la pédofaune et des micro-organismes participant à cette décomposition.



- la décomposition des litières, processus clé des cycles biogéochimiques, ainsi que les interactions entre la mixité des litières et le stress hydrique sur le processus de décomposition (modifications potentielles des relations biodiversité-fonctionnement sous contrainte hydrique) ;

- la biodiversité aérienne et édaphique ; il s'agit ici de percevoir, quantifier, analyser et prévoir les modifications de la biodiversité, notamment édaphique, induite par les changements climatiques. La biodiversité édaphique, à la fois élément majeur de la biodiversité globale et acteur incontournable du fonctionnement de l'écosystème, est trop mal connue tant d'un point de vue taxonomique que fonctionnel ; sa dynamique face aux changements climatiques doit être particulièrement suivie. L'accent doit être mis aussi bien sur les microorganismes que sur la micro, méso et macrofaune.

Remerciements

La plateforme expérimentale O3HP est mise en œuvre grâce au concours financier de la Région Provence Alpes Côte d'Azur, du CNRS, du département des Alpes-de-Haute-Provence et de la fédération de recherche ECCOREV, que nous remercions ici chaleureusement.

Thierry GAUQUELIN
Virginie BALDY
Catherine FERNANDEZ
Nicolas MONTES
Mathieu SANTONJA
Jean-Philippe ORTS
Institut
Méditerranéen
d'Ecologie et de
Paléoécologie - IMEP
UMR CNRS 6116
Aix-Marseille
Université - Centre
Saint-Charles case 4
3, place Victor Hugo,
13331 Marseille
Cedex 03

Michel BOER
Observatoire de
Haute-Provence - OHP
CNRS 2207 - 04870
Saint-Michel-
l'Observatoire

Ilja REITER
Fédération de
Recherche
Ecosystèmes
Continentaux et
Risques
Environnementaux
ECCOREV FR 3098
Europole
méditerranéen
de l'Arbois
13545 Aix-en-
Provence Cedex 04

Bibliographie

- Baquedano FJ, Castillo FJ (2007) Drought tolerance in the Mediterranean species *Quercus coccifera*, *Quercus ilex*, *Pinus halepensis*, and *Juniperus phoenicea*. *Photosynthetica* 45(2):229-238.
- Beniston M, Diaz HF (2004) The 2003 heat wave as an example of summers in a greenhouse climate? Observations and climate model simulations for Basel Switzerland. *Glob. planet change* 44:73-81.
- Breda N, Huc R, Granier A, Dreyer E (2006) Temperate forest trees and stands under severe drought: a review of ecophysiological responses, adaptation processes and long-term consequences. *Annals of Forest Science*, 63(6):625-644.
- Butzer KW (2005) Environmental history in the Mediterranean world: cross-disciplinary investigation of cause-and-effect for degradation and soil erosion. *Journal of Archaeological Science*, vol. 32(12):1773-1800.
- Hesselbjerg-Christiansen J, Hewitson B (2007) Regional Climate Projection. In: 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 Qin D, Manning M, Chen Z, Marquis M, Averyt KB Tignor M Miller HL (eds), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA pp 872-887.
- Jalut G, Esteban Amat A, Bonnet L, Gauquelin T, Fontugne M (2000) Holocene climatic changes in the Western Mediterranean from south-east France to south-east Spain. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*:255-290.
- Koukoura Z, Mamolos AP, Kalburtji KL (2003) Decomposition of dominant plant species litter in a semi-arid grassland. *Applied Soil Ecology* 23:13-23.
- Landmann G, Bréda N, Houllier F, Dreyer E, Flot JL (2003) Sécheresse et canicule de l'été 2003 : quelles conséquences pour les forêts françaises ? *Rev. For.* LV-4:299-308.
- Martinez-Ferri E, Balaguer L, Valladares F, Chico JM, Manrique E (2000) Energy dissipation in drought-avoiding and drought-tolerant tree species at midday during the Mediterranean summer. *Tree Physiology* 20(2):131-138.
- Nardini A, Pitt F (1999) Drought resistance of *Quercus pubescens* as a function of root hydraulic conductance, xylem embolism and hydraulic architecture. *New Phytologist* 143(3):485-493.
- Pons A, Quézel P, (1998). A propos de la mise en place du climat méditerranéen. C.R. Acad. Sci. Paris, *Sciences de la terre et des planètes*, 327 : 755-760.
- Schar C, Vidale PL, Lüthi D, Frei C, Häberli C, Liniger MA, Appenzeller C (2004) The role of increasing temperature variability for European summer heat waves. *Nature* 427:332-336.
- Wardle DA, Bonner KI, Nicholson KS (1997) Biodiversity and plant litter: Experimental evidence which does not support the view that enhanced species richness improves ecosystem function. *Oikos* 79, 247-258.

Résumé

Afin de comprendre et prévoir l'évolution de l'écosystème "chênaie pubescente" soumis aux changements climatiques, un programme s'appuyant sur l'installation in situ d'une instrumentation innovante, a été développé sur le site de l'Observatoire de Haute-Provence : O3HP (*Oak Observatory at OHP*), par différents laboratoires de recherches (IMEP, OHP, CEREGE, IBEB, ECCOREV). La chênaie de l'OHP présente, d'une part une position bioclimatique particulière et, d'autre part, la particularité de ne pas avoir été exploitée depuis la fin de la dernière guerre, constituant ainsi un exemple de ce que l'on appelle une « forêt ancienne ou subnaturelle ». Cette forêt est caractéristique des forêts patrimoniales de la région, qui s'avèrent potentiellement très sensibles aux changements globaux, notamment climatiques, qui les affectent déjà et qui vont se manifester avec plus d'intensité dans les décennies à venir. La chênaie de l'OHP se situe bioclimatiquement dans l'étage supraméditerranéen, qui correspond encore à un climat méditerranéen, mais dont la période de sécheresse estivale est réduite à un mois seulement. Une réduction des précipitations sera à même de renforcer le caractère méditerranéen en augmentant la période sèche (jusqu'à 3 mois) et donc le stress climatique estival, favorisant ainsi potentiellement le chêne vert. On peut donc s'attendre à court terme à des modifications rapides du fonctionnement d'un écosystème caractéristique de conditions mésophiles, tel que la chênaie pubescente, réduisant les surfaces occupées par ce chêne blanc, modifiant ainsi les paysages actuels et leur forte identité.

Summary

O3HP – the Oak Observatory at OHP (Observatory of Haute-Provence) - An experimental site for the study of the functioning and biodiversity of downy oak forest in the face of climate change

With the aim of understanding and forecasting the evolution of the "downy oak" ecosystem under pressure from climate change, a programme has been implemented at the site of the Observatory of Haute-Provence (S.-E. France): O3HP (Oak Observatory at OHP), backed up by the installation in situ of innovative monitoring devices by a number of research laboratories (IMEP, OHP, CEREGE, IBEB, ECCOREV). The oak stands at the OHP occupy, firstly, a special bioclimatic position and in addition have the specific trait of not having been exploited since the end of the last world war, thus providing an example of what is called an "old or nearly natural" forest. As such, they are characteristic of the heritage forests of the region which appear to be potentially very sensitive to global changes, particularly climatic changes, which are already affecting them and which are going to go on with greater impact in the decades to come. In terms of bioclimatic, the OHP oak forest is situated in the supra-Mediterranean zone, which still corresponds to a Mediterranean climate but where the period of summer drought has shrunk to one month only. A reduction in rainfall will act to reinforce the Mediterranean character by extending the dry period (up to 3 months) along with summer stress conditions, thus potentially favouring the evergreen holm oak. Hence, in the short term we can expect rapid modifications in the functioning of ecosystems characteristic of mesophilic conditions such as the downy oak forest: the area occupied by this pubescent oak will shrink, with a consequent change to current landscapes and their strong identity.

Le site d'étude à long terme de Fontblanche

par Guillaume SIMIONI et Roland HUC

Le site expérimental de Fontblanche est l'un des trois sites d'expérimentation de la région méditerranéenne française, avec celui de Puéchabon dans l'Hérault et celui de Haute-Provence. Il suit l'évolution d'une forêt mélangée à pins d'Alep et à chênes verts soumise au changement climatique et complète ainsi les deux autres sites qui étudient les écosystèmes à chênaie verte (Puéchabon) et à chênaie blanche (O3HP).

Un réseau de sites expérimentaux

Le site expérimental de Fontblanche a pour objectif d'étudier les processus impliqués dans les cycles du carbone et de l'eau d'une forêt mélangée à pins d'Alep et chênes verts, et d'évaluer l'influence que pourrait avoir le changement climatique sur ces cycles.

A ce titre, il fait partie du réseau SOERE¹ F-ORE-T qui regroupe des sites fortement instrumentés (Cf. Fig. 1), et dont l'objectif est d'étudier les cycles du carbone et de l'eau des principaux écosystèmes forestiers français. Cela se traduit par une démarche de standardisation des méthodes de mesures entre sites, une mise en place d'une base de données commune, et des projets fédérant les différents sites.

En France métropolitaine, Fontblanche est le seul site de ce type en forêt mélangée. Les recherches qui y sont menées s'organisent autour de trois éléments : les mesures expérimentales, les traitements d'exclusion et d'apport en eau, et la modélisation.

Le site

Situé dans le massif de la Sainte-Baume, dans les Bouches-du-Rhône (commune de Roquefort-la-Bédoule), il se compose d'un enclos de 80 x 80 mètres et de deux placettes attenantes de 25 x 25 mètres. Sa mise en place et son fonctionnement ont été possibles grâce aux contributions du Conseil général des Bouches-du-Rhône, de la Fédération de recherche ECCOREV², de l'INRA³, et du GIP ECOFOR⁴ via le réseau F-ORE-T. Si le site est géré par l'INRA – URFM⁵, les mesures sont aussi effectuées par des scientifiques du Cemagref, du CNRS⁶, et de l'IMEP⁷.

1 - SOERE : système d'observation et d'expérimentation au long terme pour la recherche en environnement <http://www.gip-ecofor.org/f-ore-t/>

2 - ECCOREV Ecosystèmes continentaux et risques environnementaux

3 - INRA : Institut national de la recherche agronomique

4 - GIP Ecofor : Groupement d'intérêt public Ecosystèmes forestiers

5 - URFM : Unité de recherche sur les forêts méditerranéennes

4 - ENSAIA : Ecole nationale supérieure d'agronomie et des industries alimentaires

6 - CNRS : Centre national de la recherche scientifique

7 - IMEP : Institut méditerranéen d'écologie et de paléoécologie

8 - Eddy covariance :
technique de covariance
des turbulences

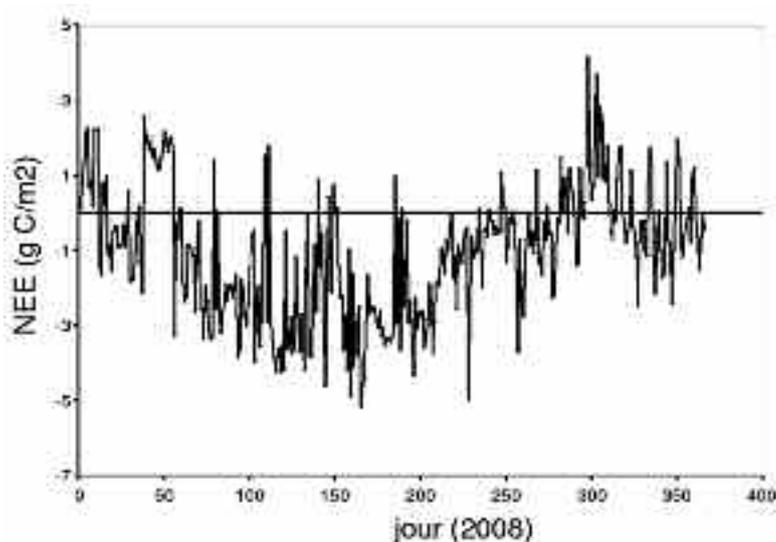


Fig. 1 (ci-contre) :
Sites du réseau F-ORE-T
en France métropolitaine.

Photo 1 :
Capteurs d'eddy
covariance situés
sur la tour à flux,
au dessus du couvert.



Fig. 2 (ci-dessous) :
Bilan net de carbone
journalier (NEE) mesuré
par eddy covariance
en 2008. Les valeurs
négatives indiquent
un stockage
par l'écosystème, alors
que les valeurs positives
traduisent une émission.



Les mesures

Les premières ont commencé en 2007. Actuellement elles concernent :

- les flux d'eau et de carbone de la plante à l'écosystème : photosynthèse, flux de sève, respiration du sol, humidité du sol, et eddy covariance (Cf. Photo 1 et Fig. 2) ;
- la croissance : dimensions des arbres, mise en place du cerne, phénologie ;
- le stress hydrique : hydraulique du bois, potentiel hydrique.

Le site a également vocation à accueillir des scientifiques désirant mettre en place d'autres études, dans la mesure où celles-ci sont compatibles avec le dispositif en place.

Les traitements

Afin d'étudier les impacts de différents niveaux de disponibilité en eau, la plupart des mesures citées plus haut sont répliquées sur quatre traitements. Chacun correspond à une parcelle de 25x25 mètres : témoin, exclusion de 30% des pluies à l'aide de gouttières, témoin avec gouttières renversées, et irrigation correspondant à un surplus de 30% des pluies.

Modélisation

En parallèle avec ces travaux expérimentaux, nous travaillons sur la modélisation des bilans de carbone et d'eau avec un modèle 3D, le plus adapté à un écosystème multispécifique et hétérogène. Les mesures expérimentales fournissent ici des données précieuses pour paramétrer et tester le modèle, avant que celui-ci ne soit utilisé pour faire des simulations d'impact du changement climatique.

G.S., R.H.

Guillaume SIMIONI et Roland HUC
INRA – Ecologie des forêts méditerranéennes
(URFM) Domaine Saint Paul Site Agroparc
84914 Avignon
guillaume.simioni@avignon.inra.fr

Veille sanitaire et dépérissement forestier dans le département des Alpes-Maritimes

par Guy MARÉCHAL et Jean LADIER

Cet article décrit l'histoire de la mise en place de l'Observatoire départemental de l'état sanitaire des forêts des Alpes-Maritimes et ses premiers résultats. Il montre l'implication politique d'un département soucieux de disposer d'un outil d'observation pour mieux répondre aux enjeux locaux liés aux effets du changement climatique sur la forêt, aussi bien aux niveaux économique, écologique et social.

L'implication du Conseil général des Alpes-Maritimes

par Guy Maréchal

Contexte

Le dépérissement de certaines forêts et notamment des sapinières, observé depuis plusieurs années dans le département des Alpes-Maritimes, a été marqué par une aggravation significative du phénomène depuis l'été 2003. Ce dépérissement surtout constaté dans les sapinières en dessous d'une tranche altitudinale de 1 450 m, se localise sur des secteurs du moyen pays tels que Roquebillière, Lantosque, Clans, Saint-Auban, Caille, La Brigue, Breil-sur-Roya et Saorge.

Dans les Alpes-Maritimes, au-delà de centaines d'hectares touchés massivement, on observe de nombreux dépérissements diffus.

Mesures mises en place par le Département

Compte tenu des enjeux locaux comprenant :

- à court terme, une diminution rapide de la valeur marchande des bois en forêt de production et des impacts environnementaux forts (impact paysager, accroissement du risque incendie...);
- à moyen terme, le risque d'une perte définitive de la valeur des bois induisant une perte de recettes pour les communes, la diminution des travaux sylvicoles et des risques d'érosion et de glissement de terrain ;
- à long terme, des incertitudes sur le renouvellement du couvert forestier ;

Le Département a souhaité s'impliquer pour que ces phénomènes, aujourd'hui locaux, soient étudiés, d'autant que les changements climatiques globaux laissent craindre à l'avenir une extension du phénomène. C'est dans cet objectif que le Conseil général des Alpes-Maritimes a mis en place deux types de mesures.

Des mesures d'urgence

Lors du vote du budget primitif 2005, le Département a instauré une aide destinée à compenser, au moins partiellement, les moins-values induites sur les coupes par le dépérissement. Cette aide d'un montant de 15 euros/m³ débardé a pour finalité, d'une part, de permettre aux communes de valoriser les bois dépérissants avant la perte définitive de leur valeur et, d'autre part, de favoriser le renouvellement du couvert forestier grâce à ces coupes.

Des mesures de suivi et de réflexion

Dès 2005, le Conseil général des Alpes-Maritimes a créé un comité de suivi chargé :

- d'étudier les causes des dépérissements forestiers sur le département ;
- d'en suivre l'évolution et de formuler des propositions de gestion adaptées.

Ce comité est composé de l'Office national des forêts (ONF), du Centre régional de la propriété forestière (CRPF), de l'Institut national de la recherche agronomique (INRA), de Météo-France, du Département Santé des forêts, du Parc national du Mercantour et du Groupement international des forêts sud-européennes.

Le comité a travaillé à l'élaboration concertée d'un protocole de suivi comprenant trois niveaux d'investigation :

- *cartographie des phénomènes de dépérissement* : cette cartographie concerne l'ensemble des peuplements qui présentent un taux significatif d'arbres morts, en particulier les futaies de pin sylvestre et de sapin. Elle est réactualisée tous les 3 ans ;

- *identification des zones à risque de dépérissement* : ce zonage établi à 20 ans sur sapin et pin sylvestre, à partir des connaissances scientifiques sur l'adaptation des essences forestières et des données techniques recueillies ;

- *suivi phytosanitaire des principales essences forestières des Alpes-Maritimes* : cette démarche a consisté en la mise en place sur 5 ans de placettes de suivi par essence forestière.

En 2007, le volet 1 du protocole, à savoir la cartographie des phénomènes de dépérissement, a été commandé à l'ONF.

En 2008, l'ONF est intervenu dans le cadre d'une convention de partenariat avec le Département, pour la mise en œuvre des volets 2 et 3 du protocole, la cartographie des zones touchées et à risque a été établie et les premières placettes d'observation implantées pour le suivi des sapinières.

En juin 2009 s'est tenu, à l'initiative du Département et en présence de tous les partenaires scientifiques, le comité de suivi scientifique du dépérissement forestier. A cette occasion, l'ONF a pu présenter les actions menées au travers des volets 2 et 3 du protocole, en particulier les placettes d'observation.

Fig. 1 :

Carte départementale des peuplements présentant des mortalités



Au total 60 placettes seront implantées selon la répartition et le calendrier suivants :

- sapin pectiné : 20 placettes implantées en 2008,
- pin sylvestre : 15 placettes implantées en 2009,
- mélèze et épicéa : 5 placettes implantées en 2010,
- pin d'Alep, chêne vert et chêne pubescent : 5 placettes implantées en 2011.

A l'issue des cinq années de suivi, l'analyse comparative des résultats devra permettre de réaliser des prospectives sur l'évolution des forêts et de préconiser les mesures à mettre en place pour adopter une gestion sylvicole adaptée.

Premiers résultats de l'Observatoire du dépérissement forestier des Alpes-Maritimes *par Jean Ladier*

Spatialisation des dépérissements à l'échelle du département

Une carte des mortalités

La cartographie du taux de mortalité des arbres sur l'ensemble du département (volet 1) réalisée au cours de l'intersaison 2007-2008 a d'abord permis de quantifier le phénomène (Cf. Fig. 1). Elle a confirmé la situation critique de sapin pectiné et du pin sylvestre : sur les 9400 ha couverts par le sapin, environ 2700 ha, soit près de 30% présentaient début 2008 un taux de mortalité supérieur à 10%, tandis que cette proportion était de 11% sur les 48500 ha de pin sylvestre. Les autres essences étaient peu touchées.

L'analyse de la répartition de ces mortalités a permis ensuite de mettre en évidence des corrélations entre mortalité et facteurs spatiaux, à différentes échelles. Les tendances pour le sapin sont les suivantes :

- à l'échelle de la région naturelle, les peuplements des Préalpes sont beaucoup plus touchés que ceux de la montagne,
- à l'échelle du versant, les quelques sapinières d'adret sont particulièrement fragiles

et les altitudes basses inférieures à 1300 mètres sont défavorables,

- à l'échelle locale, les topographies convexes ont une influence négative à altitude moyenne, c'est-à-dire de 1300 à 1500 mètres en montagne.

Tous ces facteurs peuvent être interprétés en termes thermique et hydrique, et reliés à l'intensité du stress hydrique subi par les arbres.

Pour le pin sylvestre, on retrouve une mortalité plus forte dans les Préalpes en topographie convexe, mais il semble que les ubacs soient plus touchés que les adrets, ce qui va à l'encontre de la logique générale.

Spatialisation des risques de dépérissement

Par une démarche inverse, on peut bâtir un modèle de prédiction des zones à risque de dépérissement (volet 2) en combinant les facteurs déterminants significatifs. Cela peut se traduire par une clef de détermination telle que celle établie pour le sapin (Cf. Fig. 2).

Cette clef, établie par niveaux d'échelle emboîtés, peut être traduite en une carte de vulnérabilité (Cf. Fig. 3).

On diagnostique ainsi qu'environ la moitié des sapinières et de même la moitié des pine-raies sylvestres présentent un risque de dépérissement si la tendance actuelle se prolonge, sans préjuger des changements climatiques à venir.

60 placettes permanentes de suivi sanitaire

Répartition des placettes

Les placettes permanentes sont réparties par essence sur le département. Leur installation est échelonnée depuis 2008. Le sapin pectiné et le pin sylvestre font l'objet d'un suivi plus lourd en lien avec les dépérissements constatés, tandis que le nombre de placettes est très faible pour les autres essences.

La répartition des placettes répond globalement au souhait de couvrir géographiquement et écologiquement les conditions de croissance de chaque essence dans le département. Mais, pour atteindre l'objectif fixé, l'installation de ces placettes est soumise à d'autres contraintes :

Zone géographique	Exposition	Altitude	Topographie locale	Niveau de risque	
Montagne	Ubac	> 1500 m		faible	
		1400 à 1500 m	concave ou neutre	faible	
			convexe	moyen	
		1300 à 1400 m	concave ou neutre	moyen	
		convexe	fort		
			< 1300 m		fort
	Adret		> 1700 m		faible
		1500 à 1700 m	concave ou neutre	faible	
			convexe	moyen	
		1300 à 1500 m	concave ou neutre	moyen	
			convexe	fort	
		1200 à 1300 m		fort	
		1100 à 1200 m	concave	fort	
		neutre ou convexe	très fort		
		< 1100 m		très fort	
Préalpes	Ubac	> 1300 m		fort	
		< 1300 m		très fort	
	Adret			très fort	

Fig. 2 :
Clef d'évaluation du
risque de dépérissement
des sapinières

- existence de problèmes sanitaires sur la placette ou à proximité, lorsque l'essence y est sensible. On espère en effet que le suivi des placettes rendra compte du phénomène de dépérissement en cours ;

- absence d'intervention depuis 2003 et durant la durée du projet. Cette contrainte ne pouvant être imposée à un propriétaire privé, les placettes sont implantées en forêt publique, majoritairement en forêt communale ;

- peuplement adulte > 60 ans ;
- peuplement d'une surface minimale de 5 ha.

La stratégie d'échantillonnage est adaptée à chaque essence. Ainsi, les placettes en sapinière sont réparties sur des gradients altitudinaux en versant nord car, d'une part les sapinières d'adret sont très minoritaires et peu représentatives et, d'autre part, on sait que la vigueur et la santé du sapin sont très liées à l'altitude. Pour le pin sylvestre, on a privilégié les oppositions de versants ou les variations de situation topographique, car il semble moins sensible à l'altitude qu'à l'exposition ou aux conditions locales.

Notons que la répartition des placettes de suivi ne peut rendre compte de l'état sanitaire de l'essence concernée à l'échelle du département. Ceci pour deux raisons : d'une part on cherche à suivre des dépérissements déjà enclenchés, surtout pour le sapin pectiné et le pin sylvestre, et d'autre part, le nombre de placettes est trop faible, surtout pour les autres essences.

Données recueillies

Chaque placette est circulaire et comprend une vingtaine d'arbres adultes dominants ou co-dominants qui sont mesurés et font l'objet d'un diagnostic sanitaire annuel individuel :

- coloration du feuillage,
- déficit foliaire, transparence du houppier,
- nombre d'années d'aiguilles pour les conifères,
- taux de branches mortes,
- état sanitaire du tronc,
- niveau d'infestation par le gui.

Evidemment, chaque placette est caractérisée sur le plan écologique (altitude, exposi-

tion, pente, type de substrat). On devrait ainsi pouvoir relier l'ampleur des dépérissements ou leur évolution à des facteurs physiques explicatifs.

De plus, des stations météorologiques automatiques vont être installées à proximité de chaque groupe de placettes. On devrait ainsi pouvoir relier l'évolution des dépérissements à des facteurs climatiques.

Evolution des dépérissements

Les observations annuelles sur les placettes permanentes (volet 3) permettent de suivre finement l'évolution du dépérissement à l'échelle individuelle. Nous disposons maintenant de trois années d'observations pour les placettes de sapin et de deux années de recul pour les placettes de pin sylvestre (Cf. Fig. 5).

Les sapins continuent à perdre leurs aiguilles plus vite qu'ils ne les reconstituent. Après une relative stabilisation entre 2008 et 2009, ils montrent à nouveau un affaiblissement, malgré trois années favorables en terme de pluviométrie. En 2010, le taux moyen de déficit foliaire est d'environ 20%.

De même, les pins sylvestres ont un feuillage de plus en plus clair, avec souvent deux années d'aiguilles seulement et un déficit foliaire qui atteint 30% en moyenne en 2010.

Ces résultats négatifs sont malheureusement convergents. Si tous les arbres observés ne sont pas en déclin, la tendance moyenne se retrouve dans chacune des placettes.

Des résultats à confirmer

Les premières conclusions présentées ici sont provisoires, tant pour la spatialisation des dépérissements que pour leur évolution dans le temps. La prochaine carte des mortalités donnera une nouvelle photographie de la situation et chaque année d'observation sur les placettes permettra d'affiner notre connaissance du phénomène.

L'extension départementale de l'observatoire et surtout sa pérennité en font un outil précieux et exemplaire pour comprendre les impacts des changements climatiques sur les forêts.

G.M., J.L.

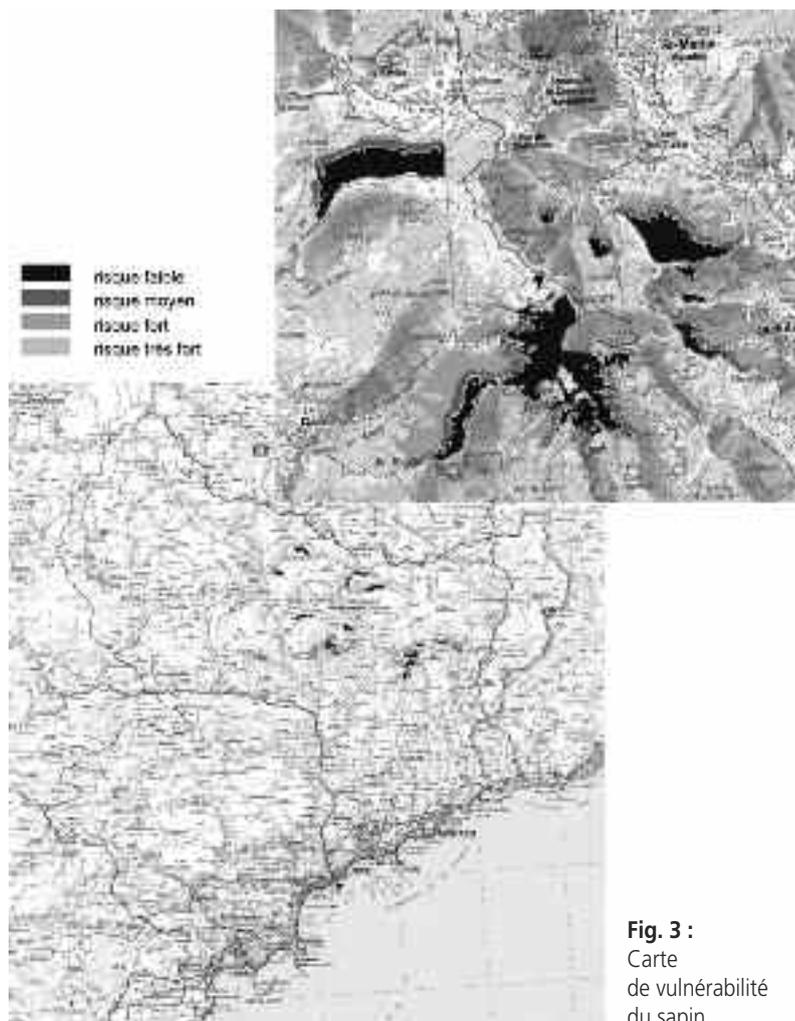


Fig. 3 :
Carte de vulnérabilité du sapin



Fig. 4 :
Carte des placettes permanentes par essence

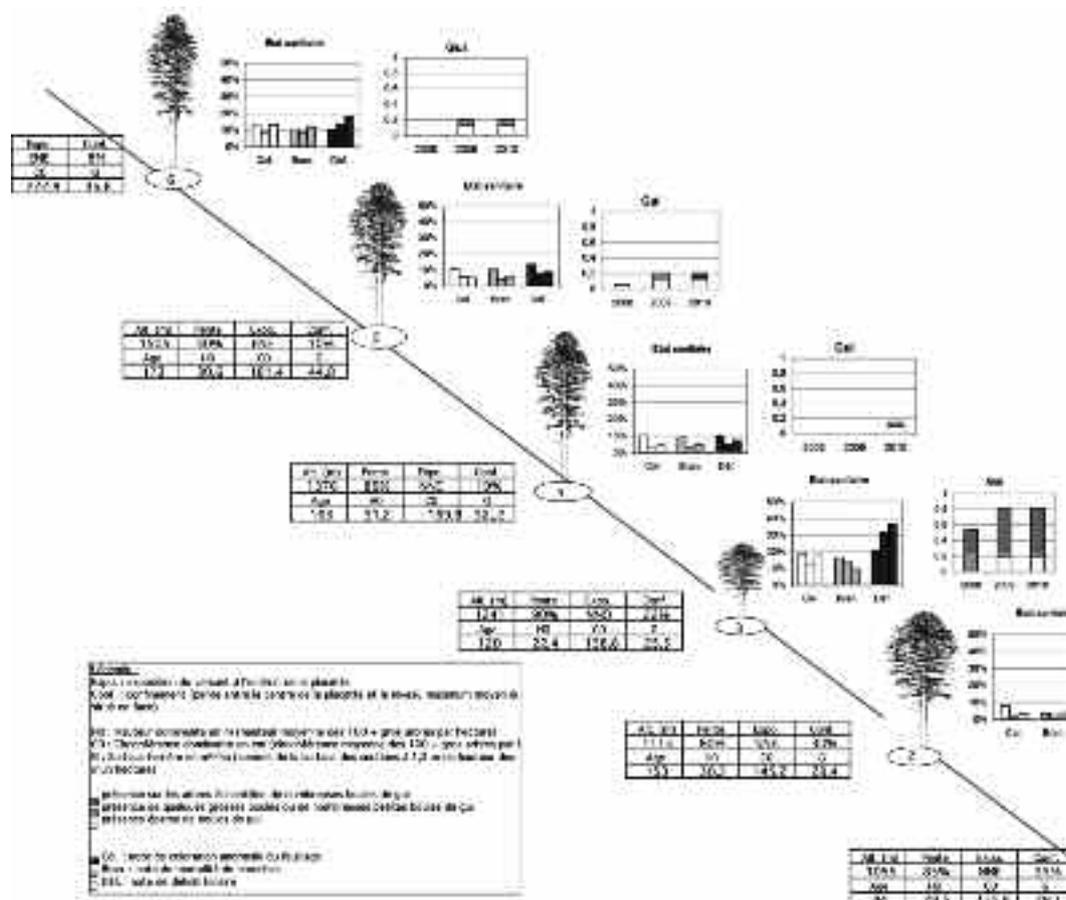


Fig. 5 :
Observation faites de 2008 à 2010 sur les placettes de sapin pectiné en forêt communale de la Bollaène-Vésudie

Résumé

Suite à la canicule de 2003 et à la période de sécheresse qui a marqué la région méditerranéenne de 2003 à 2007, des dépérissements et des mortalités dans les sapinières et les pineraies sylvestres des Alpes-Maritimes ont alarmé les propriétaires et gestionnaires forestiers. C'est ce qui a conduit le Conseil général à confier à l'ONF la mise en place d'un observatoire départemental de l'état sanitaire des forêts. Cet observatoire départemental comprend deux volets :

- 60 placettes permanentes réparties par essence sur le département depuis 2008 ; tous les arbres de ces placettes font l'objet d'un suivi annuel individuel ;
- une cartographie périodique, tous les 3 ans, du taux de mortalité des arbres sur l'ensemble du département.

Les premiers résultats font apparaître des tendances différentes entre sapin et pin sylvestre.

- la répartition de la mortalité du sapin montre que les sapinières "chaudes", situées dans les Préalpes de Grasse ou à basse altitude ou en adret sont particulièrement vulnérables. Les précipitations relativement abondantes de ces dernières années semblent avoir stabilisé leur état de santé ;
- le pin sylvestre présente un taux de mortalité plus élevé dans les Préalpes, et sur les topographies convexes avec, étonnamment, des dépérissements plus forts en ubac qu'en adret. Le dépérissement des arbres semble se poursuivre malgré l'absence de sécheresse depuis trois ans.

L'observatoire départemental est un outil précieux pour la compréhension des dépérissements forestiers, préalable indispensable à l'adaptation de la gestion.

Summary

Ongoing monitoring of health and the decline of forests in the Alpes-Maritimes *département* (S.-E. France)

Following on the 2003 heat wave and the period of drought that hit the region from 2003 to 2007, the decline and mortality in the fir and Scots pine forests of the Alpes-Maritimes area alarmed forest owners and managers. This is what led the Departmental Government Council to commission the ONF (French National Forestry Commission) to set up in the *département* an observatory for the ongoing monitoring of the state of health of woodlands. This departmental observatory has two facets:

- (i) as of 2008, 60 permanent, species-based plots spread out across the *département*; every tree in these plots is subjected to a yearly individual assessment;
- (ii) mapping at a 3-yearly interval of the death rates for trees throughout the whole *département*.

The first results have revealed different trends for the fir and the Scots pine:

- (i) the distribution of fir mortality shows that fir stands in "hot" areas, situated in the alpine foothills around Grasse, at low altitudes or on south-facing slopes, are particularly vulnerable. The relatively abundant rainfall over recent years appears to have stabilised their state of health;
- (ii) Scots pine displays a higher level of mortality in the Préalpes foothills and on convex relief with, surprisingly, greater decline on shady northern slopes than on the southern side. The decline seems to be continuing despite the absence of drought conditions over the last three years.

This departmental observatory is a valuable tool in understanding the decline and dying-off in forests, an indispensable first step in adapting overall management.

Guy MARÉCHAL
Conseil général des Alpes-Maritimes
Direction de l'écologie et du développement durable
Centre Administratif
Route de Grenoble
BP7 06030 Nice Cedex
Mél : gmarechal@cg06.fr

Jean LADIER
Office national des forêts
Actiplus - ZI Saint Joseph
04100 Manosque
Mél : jean.ladier@onf.fr

Flore méditerranéenne et changement climatique : la course-poursuite est engagée

par Michel VENNETIER et Christian RIPERT

Comme l'indique le titre de cet article, la course-poursuite entre changement climatique et flore méditerranéenne est bien engagée.

En effet, on observe déjà de sérieuses modifications de composition de la flore méditerranéenne. En outre, la compensation du déficit hydrique d'origine climatique par des conditions stationnelles favorables, qui jusqu'à présent permettait la survie d'espèces mésophiles, n'est plus suffisante.

Les stratégies d'adaptation des plantes devraient permettre une résistance temporaire et partielle, mais même les scénarios climatiques les plus optimistes ne laisseront guère le temps à cette stratégie de se mettre en place.

La conférence présentée par Michel Vennetier en novembre 2010 lors du Colloque "Observer et s'adapter au changement climatique en forêt méditerranéenne" avait déjà fait l'objet d'un article paru dans la revue *Forêt Méditerranéenne* en mars 2010 (Tome XXXI, n°1). Nous n'en publions ici que les résumés.

Résumé

Le changement climatique modifie rapidement l'aire de répartition potentielle des plantes, et devrait se traduire par des modifications de la flore forestière à différentes échelles. Dans le sud-est de la France, la forêt méditerranéenne a subi une décennie de climat exceptionnellement chaud et sec de 1998 à 2008, faisant suite à une période de réchauffement plus limité et régulier depuis les années 70. Les variations de la flore à l'échelle locale au cours de cet épisode, qui ressemble à ce que pourrait être les conditions climatiques moyennes vers 2040, ont été simulées avec un modèle bioclimatique. Elles ont aussi été mesurées dans des placettes permanentes entre deux inventaires réalisés en 1996-97 puis en 2008. Par rapport à l'inventaire de 1997, la prédiction du modèle pour les variations de flore avec le climat moyen des 30 et 10 dernières années est, respectivement, de 11 % et 25 %. Le changement observé dans les placettes permanentes représente 14 %, presque entièrement au détriment des espèces exigeantes en eau (mésophiles), remplacées par des espèces xérophiles. Ce remplacement est d'autant plus rapide que les sites sont favorables : haute altitude, exposition fraîche, sols profonds, topographie concave. Il n'est pas significatif dans les sites les plus secs et les plus chauds de la zone d'étude. Cela montre que la compensation du déficit hydrique d'origine climatique par les conditions stationnelles favorables, qui permettait la survie d'espèces mésophiles, n'est plus suffisante. Un seuil critique de stress hydrique a été dépassé. Avec le cli-

Michel VENNETIER*
Christian RIPERT
Unité de Recherche
Ecosystèmes
Méditerranéens
et Risques
Cemagref
Aix-en-Provence
CS 40061
13182 Aix-en-
Provence Cedex 5
* Auteur
correspondant :
michel.vennetier@
cemagref.fr

mat futur, le phénomène devrait gagner progressivement des stations plus défavorables et des zones plus sèches. Il semble qu'une vingtaine d'années serait nécessaire pour que la flore atteigne l'équilibre avec le climat moyen de la dernière décennie. A l'échelle du paysage, les stratégies d'adaptation des plantes et la diversité de la mosaïque stationnelle permettent une résistance temporaire et partielle de composition végétale. Mais les 25% de changement floristique prédits par le modèle devraient être atteints avant la moitié du XXI^e siècle, même pour les scénarios climatiques les plus optimistes.

Summary

Mediterranean flora and climate change: the race is on

Climate change has rapidly modified the potential distribution of plants and should result in the modification of forest flora at various levels. In southeastern France between 1998 and 2008, Mediterranean forests faced a decade of exceptionally warm and dry weather that followed on a period of more limited and regular warming starting in the 1970's. Variations in the flora at a local scale during this episode, which it is thought could well resemble average climatic conditions by 2040, were simulated using a bioclimatic model. These variations were also measured in permanent plots between two surveys (1996-97 and 2008). Starting from the 1997 survey, the prediction of the model for species turnover on the basis of the average climate of the last 30 and 10 years were, respectively, 11 % and 25 %. The turnover observed in the permanent plots reached 14 %, almost completely at the expense of moisture-requiring species (mesophilous) which were replaced by drought-tolerant (xerophytic) species. This change was that much faster as a site was favorable: high altitude, cool exposure, deep soils, concave topography. Change was not significant in the driest and the hottest sites in the study area. These data show that the compensation of a climatic water deficit by favorable site conditions, which up to now have enabled mesophilic species to survive, was no longer sufficient. A critical stress threshold due to scarcity of water had been passed. With the expected future climate, this phenomenon should gradually spread into less favorable sites and drier areas. It seems that, with the average climate of the last decade, about twenty years will be necessary for flora to reach equilibrium. At the level of whole landscapes, the plants' adaptation strategies and a mosaic pattern of highly diverse sites should permit a temporary and partial resistance of constituent species. But the 25 % change in the flora as forecast by the model will no doubt be reached before the middle of the 21st century, even with the most optimistic climate scenario.

Riassunto

Flora mediterranea e cambiamento climatico : la gara d'inseguimento è iniziata

Il cambiamento climatico modifica rapidamente l'area di ripartizione potenziale delle piante, e dovrebbe tradursi da modifiche della flora forestale a diversi scale. Nel sud-est della Francia, la foresta mediterranea ha subito un decennio di clima essenzialmente caldo e secco dal 1998 al 2008, seguendo un periodo di riscaldamento più limitato e regolare negli anni 70. Le variazioni della flora alla scala locale nel corso di questo episodio che somiglia a ciò che potrebbero essere le condizioni climatiche medie verso il 2040, sono state simulate con un modello bioclimatico. Sono state anche misurate nelle piazzette permanenti tra due inventari realizzati nel 1996-97 poi nel 2008. Rispetto all'inventario del 1997, la predizione del modello per le variazioni di flora col clima medio dei 30 e 10 ultimi anni è rispettivamente di 11% e 25%. Il cambiamento osservato nelle piazzette permanenti rappresenta 14%, quasi interamente al detrimento delle specie esigenti in acqua (mesofile), sostituite da specie xerofile. Questo cambio è tanto più rapido quanto i siti sono favorevoli : alta altitudine, esposizione fresca, suoli profondi, topografia concava. Non è significativo nei siti più secchi e più caldi della zona di studio. Questo mostra che la compensazione del deficit idrico di origine climatica dalle condizioni stazionali favorevoli, che permetteva la sopravvivenza delle specie mesofile, non è più sufficiente. Una soglia critica di stress idrico è stato superato. Col clima futuro, il fenomeno dovrebbe guadagnare progressivamente stazioni più sfavorevoli e zone più secche. Sembra che una ventina di anni sarebbe necessaria per che la flora raggiunga l'equilibrio col clima medio dell'ultimo decennio. Alla scala del paesaggio, le strategie di adattamento delle piante e la diversità del mosaico stazionale permetterebbe una resistenza temporaria e parziale di composizione vegetale. Ma i 25% di cambiamento floristico predetti dal modello dovrebbero essere raggiunti prima della metà del XXI^o secolo per gli scenari climatici più ottimisti.

Les résultats des projets CARBOFOR et ANR-QDiv et les questions qu'ils soulèvent

Les avancées apportées par le projet ANR-Climator

par Vincent BADEAU

Face aux changements climatiques, les gestionnaires forestiers se posent de nombreuses questions. Quel avenir pour les espèces actuelles ? Que prédisent les modèles ? Quelles successions envisager ? Que conserver et comment ?... Vincent Badeau fait ici le point sur les différents travaux entrepris pour identifier les relations entre la distribution des espèces et le climat, afin d'estimer comment ces distributions pourraient être modifiées en réponse aux différents scénarios climatiques. Il montre aussi qu'il est nécessaire de coupler différentes approches de modélisation pour espérer encadrer de façon satisfaisante les projections pour le futur.

L'influence de l'homme sur le climat global étant largement admise par la communauté scientifique, et les résultats obtenus sur l'Holocène ayant montré que la réponse des espèces aux changements climatiques anciens s'est exprimée par de forts décalages géographiques des aires de répartition (BRADSHAW *et al.*, 2000, BRADSHAW & HANNON, 2004, SÁNCHEZ-GOÑI *et al.*, 2008), on assiste depuis une quinzaine d'années à un renouveau des études biogéographiques. De nombreux travaux ont été entrepris pour identifier les relations entre la distribution des espèces et le climat afin d'estimer comment ces distributions pourraient être modifiées en réponse aux différents scénarios climatiques. Les premières études françaises ont été lancées dans le cadre du projet GICC-Carbofor. Elles ont été complétées depuis par d'autres travaux notamment dans le cadre de deux projets financés par l'Agence nationale de la recherche (ANR) ; les projets QDiv et Climator. Cet article fait le point sur une partie de ces travaux.

1 - Projet GICC
2002/2004

Retour sur le projet Carbofor¹

Au début des années 2000, plusieurs études sur les déplacements potentiels des aires de distribution étaient déjà disponibles en Europe, soit à des échelles régionales avec une résolution fine, soit sur des espaces plus importants mais au détriment de la résolution spatiale (SYKES *et al.*, 1996 ; PEARSON *et al.* 2002). A l'échelle française, aucune étude spécifique n'avait encore été réalisée, principalement en raison de l'absence de données homogènes, mais le travail devenait possible, d'une part, grâce aux données de l'Inventaire forestier national (IFN) et, d'autre part, grâce aux données climatiques spatialisées de Météo-France.

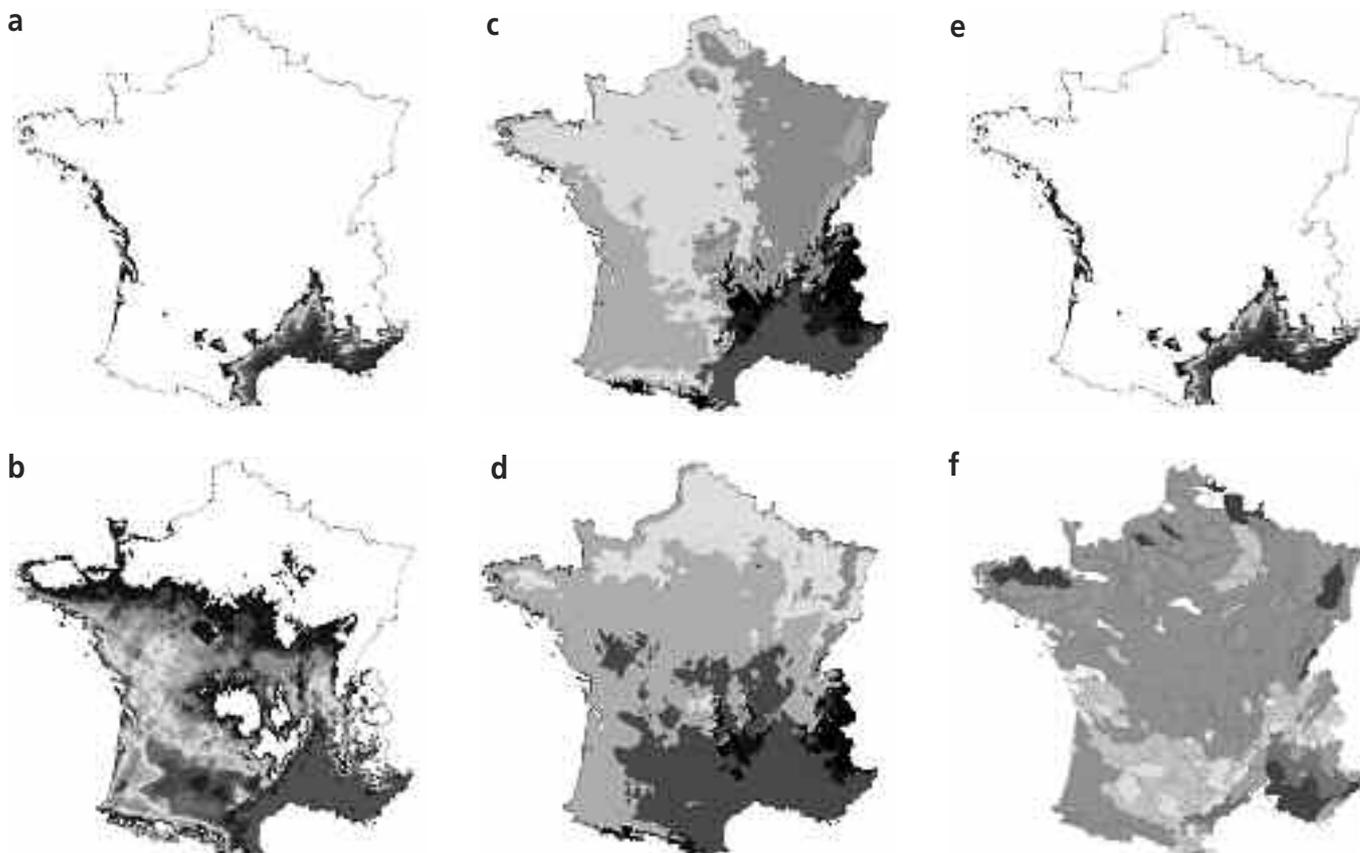
Les données de l'IFN permettent de cartographier la répartition actuelle des espèces ligneuses et herbacées avec un haut degré de précision par rapport aux cartes utilisées à l'échelle européenne : la pression d'échantillonnage de l'IFN est de l'ordre d'un point pour 135 ha de forêt alors que les cartes éditées par Flora Europaea (JALAS & SUOMINEN,

1972) utilisent un maillage de 50 km. Les données climatiques correspondent, d'une part, à des interpolations spatiales des normales trentenaires de températures et de précipitations à un pas de 1 km (modèle AURELHY de Météo-France, BENICHOU & LE BRETON, 1987) et, d'autre part, aux données de flux radiatifs issues des observations Météosat (Service d'archivage et de traitement météorologique des observations spatiales, CNRS-Météo-France). Enfin, des cartes de réserve utile en eau et de pH peuvent être dérivées de la carte des sols de France au 1/1 000 000^e (US Infosol, INRA-Orléans).

Les cartes de présence/absence des espèces peuvent alors être reliées statistiquement aux facteurs environnementaux, afin d'identifier les contraintes pesant sur les aires de répartition actuelles et de modéliser les évolutions potentielles de ces aires dans le cadre de scénarios climatiques.

Ces modèles, calibrés sur des essences individuelles (chêne vert, hêtre, etc.), des groupes d'essences (groupes chorologiques

Fig. 1 :
Modélisation de la répartition actuelle du chêne vert (a) et de l'évolution potentielle de son aire de répartition en 2100 (b). Répartition actuelle de 7 groupes biogéographiques déterminés par l'analyse de la distribution des 70 espèces ligneuses observées par l'IFN (c) et évolution spatiale potentielle de ces biomes en 2100 (d). Caractérisation du degré de méditerranéité actuel de la flore forestière (1200 espèces) par analyse factorielle (e) et évolution de ce caractère en 2100 (f). D'après Badeau *et al.* (2004, 2010) et Wallerich (2006).



établis à partir des 70 espèces ligneuses observées par l'IFN) ou la flore accompagnatrice (de l'ordre de 1200 espèces relevées par l'IFN), montrent qu'il est relativement facile d'identifier les contraintes climatiques pesant sur la répartition géographique des espèces forestières. Les projections de ces modèles selon un scénario climatique aux horizons 2050 et 2100 (modèle ARPEGE de Météo-France et scénario d'émission B2) montrent tous une progression potentielle des ensembles méditerranéen et aquitain et une régression potentielle des ensembles représentatifs des domaines montagnard et de la moitié nord de la France (Cf. Fig. 1).

Les principales conclusions du projet Carbofor sont donc que i) malgré les fortes pressions anthropiques liées à la sylviculture, l'empreinte climatique est déterminante pour expliquer la distribution actuelle des espèces forestières, ligneuses ou non, sur le territoire et que ii) une relativement faible évolution de ces contraintes (le scénario B2 est l'un des plus optimistes avec une progression des températures de l'ordre de 2°C) pourrait conduire à des modifications profondes de nos paysages.

Ces résultats sont cependant entachés de fortes incertitudes. La méthode choisie pour le traitement des données peut être mise en œuvre rapidement et elle permet de tester "en routine" un grand nombre d'hypothèses de travail (sur les espèces, les groupes d'espèces, les variables climatiques, etc.) mais c'est une modélisation statique et statistique des aires de répartition. Cette approche classique suppose qu'en tout point de l'espace, la présence de l'espèce soit déterminée par un ensemble fini de paramètres environnementaux et on admet que la modification de ces paramètres produit des changements instantanés dans la végétation, sans prendre en compte les processus dynamiques comme la migration, la compétition, les dépérissements, la mortalité, la variabilité génétique, les interactions biotiques, etc. Bien que la plupart des variables entrant dans les modèles semblent avoir une signification physiologique, l'approche n'est que corrélative et non pas causale. Enfin, les projections sont faites "à environnement constant", c'est-à-dire qu'il n'est pas possible de prendre en compte dans ces modèles de niche des rétroactions liées à l'augmentation des concentrations atmosphériques en CO₂. C'est pour explorer certains de ces problèmes que le projet QDiv a été lancé.

Le projet QDiv

*Quantification des effets des changements globaux sur la diversité végétale*²

L'objectif de ce projet est de développer des outils quantitatifs de prédiction des effets des changements globaux sur la diversité et la répartition spatiale des plantes en France en s'appuyant sur un ensemble d'observations, d'expériences et de modèles. Différents modèles de répartition actuelle et future sont calculés afin d'accroître la qualité des projections, voire de dégager un consensus sur les risques associés aux changements du climat et des concentrations atmosphériques en CO₂ en éprouvant nos connaissances des mécanismes qui piloteront les changements d'aires de répartition (aide aux stratégies d'adaptation). Ces modèles sont des modèles de niche : Nancy-NBM (BADEAU *et al.*, 2010), Biomod (THULLER, 2003) et Stash (SYKES *et al.*, 1996) ; un modèle de phénologie (Phenofit, CHUINE & BEAUBIEN 2001) ; trois modèles dynamiques globaux de végétation : Orchidée (KRINNER *et al.*, 2005), Ibis (KUCHARIK *et al.*, 2000), LPJ (STICH *et al.*, 2003) et un modèle mécaniste, Castanea (DUFRENE *et al.*, 2005).

Toutes les équipes (INRA Nancy, LECA Grenoble, CEFÉ Montpellier, CNRM Météo-France, ESE Orsay, LSCE Saclay), travaillent avec un lot commun de données agrégées sur des mailles de 8 km : des données climatiques journalières couvrant la période 1950-2100 (Centre européen de recherche et de formation avancée en calcul scientifique) ; des données de présence/absence pour sept espèces observées par l'IFN (hêtre, chêne vert, complexe des chênes sessile / pédonculé / pubescent, mélèze, pin sylvestre) ; des pH, profondeurs de sols et réserves utiles en eau issus de la carte des sols de France au 1/1 000 000^e (US Infosol, INRA-Orléans).

Sans entrer dans le détail des résultats en cours de publication, nous pouvons dire que tous les modèles répondent globalement "dans le même sens" pour une espèce donnée. Les modèles statistiques sont toutefois plus efficaces que les modèles mécanistes pour redessiner les contours actuels des aires de répartition. Ce résultat est difficilement interprétable de façon univoque puisque les modèles statistiques s'appuient sur les observations (calibration selon l'aire réalisée) alors que les modèles mécanistes

2 - ANR Biodiversité, projet coordonné par Paul Leadley (Université Paris-Sud XI), 2005-2008 (2010), en cours de publication.

3 - ANR Vulnérabilité, milieux et climats, Nadine Brisson (Unité Agroclim, INRA-Avignon), 2007-2009(10).

(plus satisfaisant du point de vue du fonctionnement physiologique des espèces) retranscrivent des niches fondamentales. Pour les périodes futures, les modèles mécanistes simulent, de façon générale, des évolutions moindres des distributions que les modèles de niche. Pour le pin sylvestre, le chêne vert ou le groupe fonctionnel des feuillus sempervirents, les différents modèles sont en accord dans toutes les régions et mettent en évidence le rôle clé des températures. Pour le hêtre, le chêne pédonculé ou les feuillus décidus tempérés, les modèles projettent de fortes régressions en plaine, des régressions en montagne moins affirmées (voire des progressions pour certains modèles). Pour ces espèces, le bilan hydrique semble jouer un rôle clé ainsi que les concentrations en CO₂ atmosphérique que ne peuvent prendre en compte les modèles statistiques (d'où leur moins grand conservatisme).

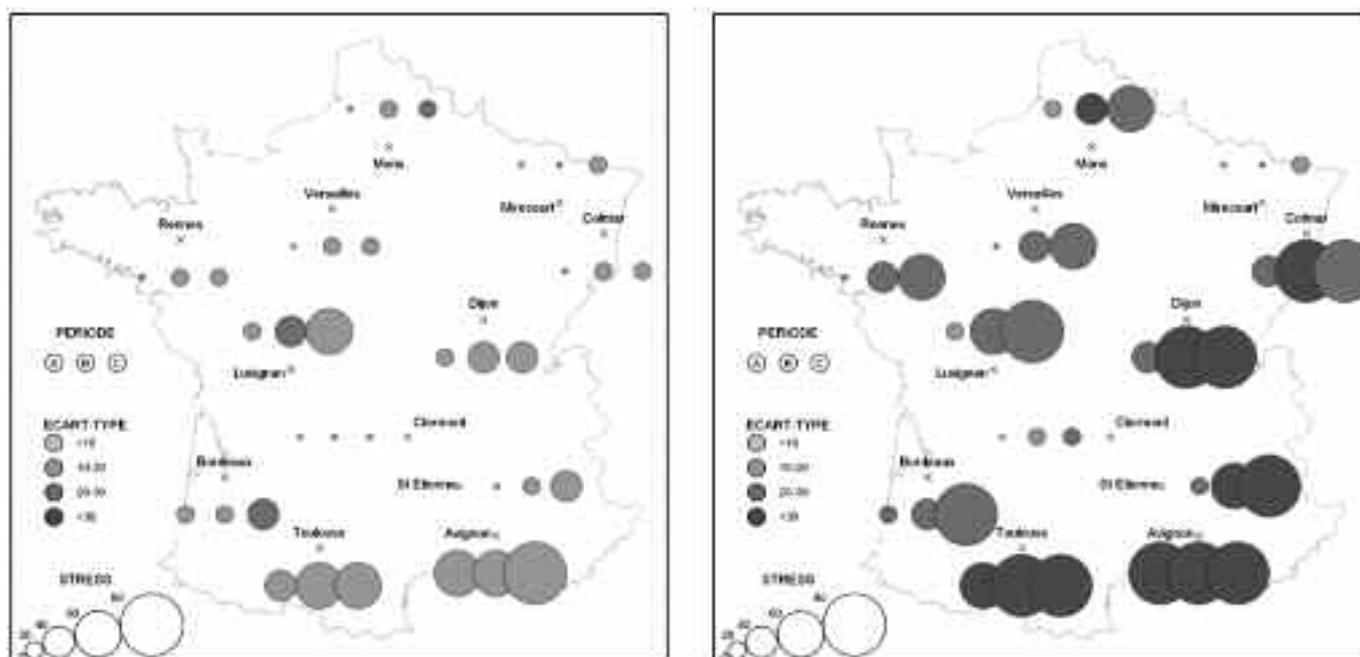
Sans remettre en cause les acquis du projet Carbofor, les résultats du projet QDiv soulignent les incertitudes mises en évidence par l'utilisation de différents modèles sans que l'un ou l'autre puisse être qualifié de meilleur. Les modèles mécanistes devraient, en théorie, être plus performants pour projeter le devenir des espèces dans un domaine de conditions environnementales non encore observées, mais leur complexité les rend difficile à paramétrer ce qui conduit à de larges incertitudes sur les projections dans

un environnement non constant. Si les modèles de niche semblent surestimer les évolutions potentielles des aires, il est fort probable que les modèles mécanistes les sous-estiment en raison d'un poids trop important accordé aux effets bénéfiques des augmentations de CO₂. Ajoutons à cela qu'aucun modèle n'est actuellement capable de prendre en compte des interactions avec les insectes, les maladies, les extrêmes climatiques, etc.

Le projet CLIMATOR Elaboration d'outils de références pour l'analyse de la vulnérabilité des agro-écosystèmes face au changement climatique³

L'objectif majeur du projet est de donner une vision la plus exhaustive possible du poids relatif des grandes fonctions écologiques et écophysologiques dans un contexte climatique changeant (fonctionnement hydrique, phénologie, accidents climatiques, interactions eau-carbone-azote au sein des couverts végétaux et dans les sols, adaptation de la microflore du sol aux fortes températures, risques phytosanitaires, durabilité des systèmes, etc.) et de diffuser de façon opérationnelle ces résultats auprès des scientifiques, des étudiants et des professionnels

Fig. 2 :
Evolution de l'intensité du déficit hydrique pour une forêt de feuillus (à gauche) et une forêt de conifères (à droite), pour le passé récent (A), le futur proche (B) et le futur lointain (C).
D'après Bréda et al., 2010



des métiers de l'agriculture et de la forêt. Un "cours en ligne"¹ a été ouvert et un "livre vert"² a été rédigé en collaboration avec les professionnels.

Dans ce projet, un effort particulier a été fait pour quantifier et hiérarchiser les sources d'incertitudes et de variabilité. Les incertitudes renvoient à une limite des connaissances, soit de façon irréductible (cas des scénarios d'émission de gaz à effet de serre), soit de façon réductible car liée à l'état actuel de la science (cas des modèles climatiques, des méthodes de régionalisation, des modèles d'impacts). Les sources de variabilité sont soit subies (variabilité des sols et des sites géographiques), soit constituent des choix possibles pour la conduite des cultures (choix des variétés, des provenances, des itinéraires techniques).

Le projet CLIMATOR regroupe dix-sept équipes et vingt-deux modèles agronomiques reconnus représentant le fonctionnement de quatre grands types de systèmes (cultures en rotations, prairies, vignes et forêts). Il s'appuie sur treize sites expérimentaux de l'INRA représentatifs des climats des grandes régions agricoles françaises (Avignon, Bordeaux, Clermont-Ferrand, Colmar, Dijon, Mirecourt, Mons, Lusignan, Rennes, St-Etienne, Toulouse, Versailles, la Guadeloupe) ; trois (ou cinq) types de sols caractéristiques des différentes cultures ; six modèles climatiques (deux versions du modèle ARPEGE (Météo France & CERFACS), deux modèles américains (GISS & NCAR), un modèle canadien (CCCMA) et un modèle japonais (MRI) ; trois scénarios d'émission (A2, B1, A1B) ; trois méthodes de régionalisation des Modèles de Circulation Générale (anomalies [ANO], corrections variables [QQ], régimes de temps [TT]).

Pour la forêt, le protocole de simulation s'appuie sur trois modèles : BILJOU, un modèle fonctionnel de bilan hydrique des peuplements (GRANIER *et al.*, 1999) ; GRAECO, un modèle fonctionnel couplant eau, carbone, croissance et gestion sylvicole (LOUSTAU *et al.*, 2005) et des modèles statistiques de l'évolution des présences d'essences (BADEAU *et al.*, 2010). Trois types de couverts sont étudiés : feuillus (type hêtre ou chêne vert), conifères à fort indice foliaire (sapin, épicéa, douglas) et plantation de pin maritime avec un sous-étage herbacé.

Pour le bilan hydrique, les simulations réalisées dans le cadre de Climator font

apparaître que l'intensité du déficit hydrique augmente au cours du temps, quels que soient le sol, la projection climatique et le site. Cette dégradation du bilan hydrique des forêts est particulièrement marquée pour les forêts de conifères à fort indice foliaire et ceci dès le futur proche (Cf. Fig. 2). À noter que la recharge en eau des sols est meilleure dans les forêts de feuillus décidues qui bénéficient d'une restitution en eau plus importante au milieu en dehors de la période de végétation, quand il n'y a plus de feuillage. Les analyses mettent également en évidence une tendance à la réduction progressive de la consommation en eau des peuplements, liée aux régulations induites par les sécheresses qui affecteront en retour la fixation du carbone, et donc la productivité.

Les impacts du changement climatique sur le rendement ne sont étudiés que pour le pin maritime. Les résultats montrent des pertes significatives de rendement pour tous les sites (sauf Mirecourt à l'horizon 2050). Ces pertes relativement faibles au futur proche (- 4,6% en moyenne) s'aggravent dans un futur lointain (- 11% en moyenne). Ces résultats sont conditionnés en premier ordre par l'augmentation des températures annuelles moyennes, puis par la baisse de la pluviométrie (augmentation de la demande évaporative et baisse de la disponibilité en eau du sol). Pour maintenir un état hydrique correct, les arbres limitent alors leur transpiration ce qui limite leur photosynthèse et, au final, la productivité. L'augmentation de la concentration en CO₂ peut finalement être considérée comme la seule modification se traduisant par un effet positif sur la productivité des peuplements. Pour le pin maritime, bien que les valeurs absolues de perte de rendement dépendent fortement de la méthode de régionalisation du climat, toutes convergent vers une évolution négative de la productivité (Cf. Fig. 3).

Trois des modèles statistiques, développés dans le cadre du projet Carbofor sont utilisés dans le projet Climator : chêne vert, hêtre et zones biogéographiques (groupes d'espèces). Les différents scénarios climatiques appliqués à ces modèles conduisent à des résultats cohérents avec ceux des projets Carbofor et QDiv : diminution des probabilités de présence du hêtre sur tout le territoire ; augmentation des probabilités de présence du chêne vert vers le nord de la France ; extension spatiale des groupes biogéographiques méditerranéen et aquitain. Cependant,

1 - www.avignon.inra.fr/cours_en_ligne_climator

2 - Téléchargeable gratuitement à l'adresse suivante : www.inra.fr/la_sciences_et_vous/dossiers_scientifiques/changement_climatique/en_savoir_plus/ouvrages/livre_vert_du_projet_climator

l'exercice Climator met en lumière les incertitudes sur l'évolution potentielles des niches en lien avec les séries climatiques utilisées. Dans le cas du hêtre par exemple, les plus fortes régressions potentielles ne sont pas directement liées au scénario d'émission : selon les sites étudiés, les scénarios A1B ou B1 peuvent avoir un impact plus important que le scénario A2, en théorie plus « pessimiste ». Ces différences de réponses ne sont pas forcément conservées dans le temps : localement, la hiérarchie des scénarios peut être modifiée entre le futur proche et le futur lointain. A scénario constant (A1B) l'influence des méthodes de régionalisations n'est pas homogène entre les sites (une méthode donnée ne conduit pas de façon univoque à des résultats plus optimistes ou plus pessimistes). Les différentes méthodes de régionalisation peuvent avoir des impacts plus forts que ceux générés par les différents scénarios d'émission (Cf. Fig. 4).

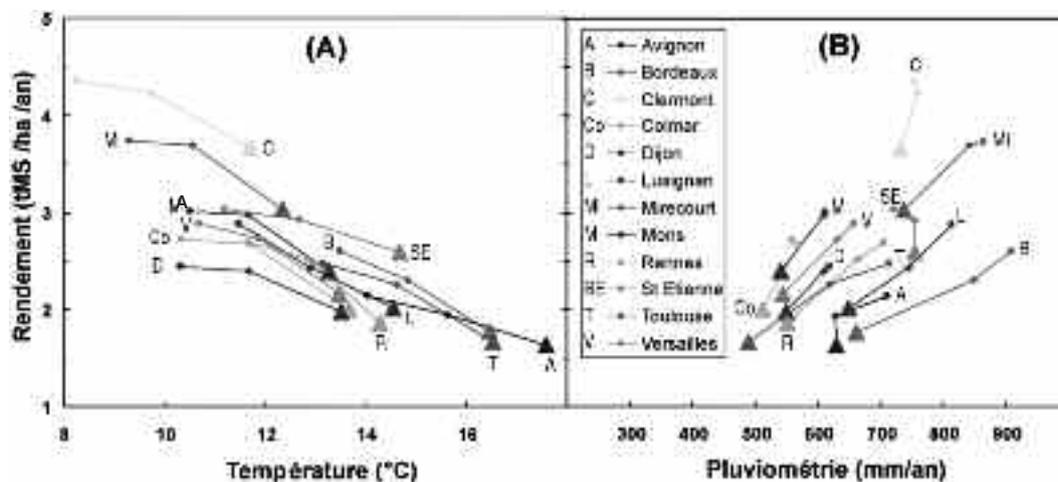
Même si un croisement exhaustif de toutes les modalités n'a pas été matériellement possible, les simulations réalisées dans le cadre du projet mettent en évidence que la variabilité interannuelle du climat et la variabilité géographique restent les sources majeures de variabilité des résultats des modèles. Pour le futur lointain, le poids du scénario climatique domine largement les effets dus à la méthode de régionalisation, mais à l'horizon du futur proche leurs variabilités sont du même ordre de grandeur. La variabilité due aux types de sol est supérieure ou au moins égale aux incertitudes sur le changement climatique (tous scénarios et méthodes de régionalisation confondus).

Conclusions

Les résultats du projet Carbofor n'ont pas été remis en question par les analyses réalisées dans le cadre des projet QDiv et Climator. Divers éléments ont cependant pu être précisés. Le changement climatique entraînera des conditions plus défavorables pour les couverts forestiers, essentiellement en raison de l'augmentation des températures et des stress hydriques ; niveau de stress étant par ailleurs dépendant de la surface évaporante des forêts (indice foliaire ou LAI). L'augmentation de la concentration en CO₂ de l'atmosphère concomitamment à l'élévation des températures est très certainement un élément clé de l'évolution des écosystèmes, cependant la quantification de cette compensation reste encore très incertaine (cf. les modèles mécanistes de QDiv ou le modèle Graeco pour Climator). A l'inverse des grands systèmes de culture, il y a peu d'incertitude sur le sens des effets du changement climatique sur les forêts et les stratégies d'évitement semblent limitées.

Ces résultats mettent en évidence le caractère prospectif, et non prévisionnel, de la simulation des impacts du changement climatique sur les couverts forestiers : face aux différentes sources d'incertitude et de variabilité, les projets QDiv et Climator montrent qu'il est nécessaire de coupler différentes approches de modélisation pour espérer encadrer de façon satisfaisante les projections pour le futur. Tous ces projets, grâce à un travail conjoint avec les différentes communautés de climatologues et de modélisateurs, fournissent un nouveau cadre d'ana-

Fig. 3 :
Evolution, sur les 12 sites (scénario A1B, méthode de régionalisation QQ, Sol 3) du rendement du pin maritime (FCM) en fonction de la température annuelle moyenne (A) et de la pluviométrie annuelle moyenne (B). Pour chaque station, les trois points reliés représentent les trois périodes Passé récent (PR), Futur proche (FP) et Futur lointain (FL), où FL est représenté par le triangle.



lyse multi-modèles et multi-scénarios des impacts que pourrait avoir l'évolution du climat sur les peuplements forestiers.

V.B.

Bibliographie

Badeau V., Dupouey J.L., Cluzeau C., Drapier J., 2005. Aires potentielles de répartition des essences forestières d'ici 2100. *Forêt Entreprise*, 162, avril 2005, 25-29.

Badeau V., Dupouey J.L., Cluzeau C., Drapier J., Le Bas C., 2010. *Climate change and the biogeography of French tree species: first results and perspectives*. Loustau, D. (Editeur). Forests, Carbon Cycle and Climate Change. Versailles (FRA) : Editions Quae ; Update Sciences et Technologies : 231-252.

Benichou P. & Le Breton, 1987. Prise en compte de la topographie pour la cartographie des champs pluviométriques statistiques. *La Météorologie*, 19, 23-34.

Bradshaw R.H.W., Holmqvist B.H., Cowling S.A. & Sykes M.T., 2000. The effects of climate change on the distribution and management of *Picea abies* in southern Scandinavia. *Can. J. For. Res.*, 30, 1992-1998.

Bradshaw R.H.W. & Hannon G.E., 2004. The Holocene structure of North-west European temperate forest induced from palaeoecological data. In: Honnay, Verheyen, Bossuyt & Hermy (Eds.), *Forest Biodiversity*, 2004, IUFRO – CABI Publishing, 11-25.

Chuine I. & Beaubien E., 2001. Phenology is a major determinant of temperate tree distributions. *Ecology Letters*, 4: 500-510.

Dufrêne E., Davi H., François C., Le Maire G., Le Dantec V., Granier A., 2005. Modelling carbon and water cycles in a Beech forest. Part I: Model description and uncertainty analysis on modeled NEE. *Ecological Modelling*, 185: 407-436.

Granier A., Bréda N., Biron P. & Villette S., 1999. A lumped water balance model to evaluate duration and intensity of drought constraints in forest stands. *Ecological Modelling* 116 : 269-283.

Jalas J. & Suominen J., 1972–1991. *Atlas Flora Europaeae: Distribution of Vascular Plants in Europe*, vols. 1 - 9. Societas Biologica Fennica Vanamo, Helsinki.

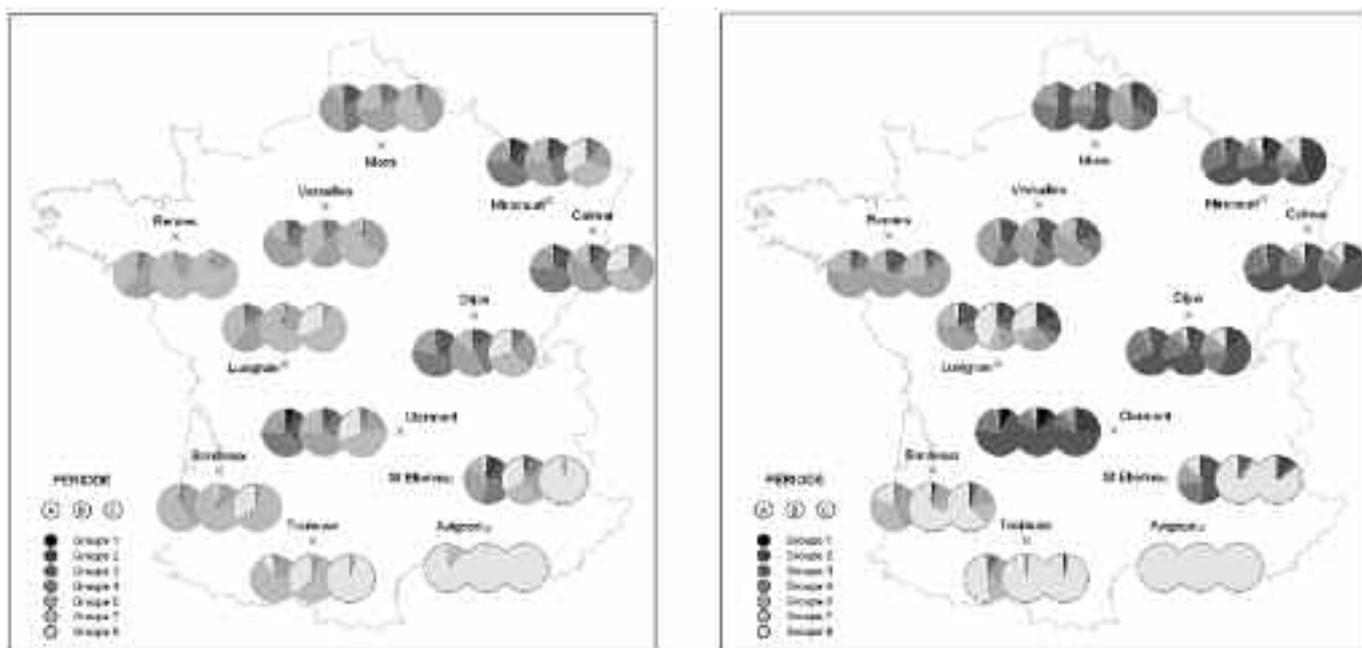
Krinner G., Viovy N., de Noblet N., Ogée J., Polcher J., Friedlingstein P., Ciais P., Sitch S. & Prentice I., 2005. A dynamic global vegetation model for studies of the coupled atmosphere-biosphere system. *Glob. Biogeochem. Cycles*, 19 (1), GB101510.1029/2003GB002199.

Kucharik C. J., Foley J. A., Delire C., Fisher V. A., Coe M. T., Lenters J. D., Young-Molling C., Ramankutty N., Norman J. M. & Gower S., 2000. Testing the performance of a Dynamic Global Ecosystem Model: Water balance, carbon balance, and vegetation structure, *Global Biogeochem. Cycles*, 14(3), 795– 826.

Loustau D., Bosc A., Colin A., Ogee J., Hendrick D., Francois C., Dufrene E., Deque M., Cloppet E., Arrouays D., Le Bas C., Saby N., Pignard G., Hamza N., Granier A., Bréda N., Ciais P., Viovy N., Delage J. (2005) – Modelling the climate change effects on the potential production of French plains forests at the sub regional level. *Tree Physiology*, 25, 313-323.

Vincent BADEAU
UMR INRA-UHP
Écologie & écophysiologie forestières
Équipe phytoécologie forestière
Centre INRA de Nancy
54280 Champenoux
badeau@nancy.inra.fr

Fig. 4 : Probabilité d'occurrence de 7 groupes biogéographiques : méditerranéen (groupe 8), aquitain (groupe 7), Nord-Ouest (groupe 6), Nord-Est (groupe 4), montagnards (groupes 1,2,3), pour les trois périodes étudiées : A passé récent, B futur proche, C futur lointain, selon le scénario A1B régionalisé par la méthode QQ (à gauche) ou la méthode TT (à droite).



Remerciements à

A. Bosc, N. Bréda, N. Brisson, A. Cheaib, I. Chuine, C. Cluzeau, C. Delire, J. Drapier, E. Dufréne, J.L. Dupouey, C. François, E. Gritti, P. Leadley, C. Le Bas, M. Legay, F. Levraut, D. Loustau, C. Massoni, W. Thuiller, N. Viovy, M. Wallerich.

Pearson R.G., Dawson T.P., Berry P.M. & Harrison P.A., 2002. SPECIES: A Spatial Evaluation of Climate Impact on the Envelope of Species. *Ecological Modelling*, 154, 289-300.

Sánchez-Goni M.F., Landais A., Fletcher W.J., Naughton F., Desprat S., Duprat J., 2008. Contrasting impacts of Dansgaard-Oeschger events over a western European latitudinal transect modulated by orbital parameters. *Quaternary Science Reviews*, 27, 1136-1151.

Sykes M.T., Prentice I.C., and Cramer W., 1996. A bioclimatic model for the potential distributions of North European tree species under present and future climates. *Journal of Biogeography*, 23, 203-233.

Stich S., Smith B., Prentice I.C., Arneth A., Bondeau A., Cramer A., Kaplan W., Levis J., Lucht S., Sykes M., Thonicke M. & Venevski K., 2003. Evaluation of ecosystem dynamics, plant geography and terrestrial carbon cycling in the LPJ Dynamic Vegetation Model. *Global Change Biology*, 9, 161-185.

Thuiller W., 2003. BIOMOD: Optimising predictions of species distributions and projecting potential future shifts under global change. *Global Change Biology* 9, 1353-1362

Wallerich M., 2006. Etude de la répartition des espèces forestières françaises : modélisation et cartographie d'ensembles biogéographiques actuels et projections possibles pour 2100. Université Henry Poincaré Nancy I, 25p.

Résumé

De nombreux travaux ont été entrepris, depuis une dizaine/vingtaine d'années, pour modéliser les relations entre la distribution des espèces et le climat, afin d'estimer comment ces distributions pourront être potentiellement modifiées. Ils concernent toutes les communautés vivantes considérées à l'échelle de l'espèce, du groupe fonctionnel ou du biome ; à des échelles régionales ou très globales ; avec des résolutions spatiales très variables et des objectifs de conservation de la biodiversité ou de production.

Les premiers résultats disponibles (2000) dans le cadre du projet CARBOFOR (cartes de déplacement potentiel de quelques grandes essences forestières) ont suscité un certain émoi dans la communauté forestière. D'autres projets de recherche ont alors été lancés pour compléter ces résultats.

Le projet ANR-QDiv utilise 8 modèles pour analyser la réponse de quelques espèces au changement climatique (modèles de niche statistiques, modèles mécanistes ; statiques ou dynamiques ; centrés sur les espèces ou les types fonctionnels).

Dans le cadre du projet ANR-Climator associant de nombreuses disciplines (climatologie, agronomie, écophysiologie, bioclimatologie, science du sol) ont été produits des méthodes et des résultats sur les incertitudes affectant les impacts régionalisés du changement climatique sur divers systèmes cultivés et pérennes.

Les analyses réalisées dans le cadre des projets QDiv et Climator ont permis de préciser certains éléments. Le changement climatique entraînera des conditions plus défavorables pour les couverts forestiers, essentiellement en raison de l'augmentation des températures et des stress hydriques. L'augmentation de la concentration en CO₂ de l'atmosphère est un élément clé de l'évolution des écosystèmes, mais dont la quantification reste encore très incertaine.

Ces résultats mettent en évidence le caractère prospectif, et non prévisionnel, de la simulation des impacts du changement climatique sur les couverts forestiers et qu'il est nécessaire de coupler différentes approches de modélisation pour espérer encadrer de façon satisfaisante les projections pour le futur.

Summary

Results of the CARBOFOR and ANR-Qdiv projects and the questions they raise - Advances brought by the ANR-Climator project

Over the last ten/twenty years, much work has been undertaken in modelling the relationship between species distribution and climate in order to assess how such distribution patterns may change in the future. The studies have involved all living communities taken at the level of single species, functional groups or a biome; at regional or more global levels; with very variable spatial resolution and with the objectives of preserving biodiversity or production.

The first results available (2000) within the framework of the CARBOFOR project (mapping of the potential displacement of certain major forest tree species) created a definite stir amongst the forestry community. Hence, other projects were launched to throw further light on these results.

The ANR-Qdiv project uses eight models to analyse the response of a number of species to climate change (statistical niche models, mechanistic models; static or dynamic; centred on species or on functional types).

Within the framework of the ANR-Climator project which involves a range of disciplines (climatology, agronomy, ecophysiology, bioclimatology, soil science), methods and results have been produced on the uncertainty concerning the impact of climate change at a regional level on various cultivated, perennial systems.

The analyses carried out within the framework of the QDiv and Climator projects have made it possible to specify certain elements. Climate change will induce less favourable conditions for forest cover, mainly because of the rise in temperature and lack of water. The increase in the amount of CO₂ in the atmosphere is a key factor in the evolution of ecosystems, though quantifying the effect remains uncertain.

Such results highlight how the simulation of the impact of climate change on forest cover is exploratory and not predictive. They also underline the necessary to combine different approaches to modelling if we hope to devise a satisfactory framework for projections about the future.

Adaptation phénologique du pin d'Alep au changement climatique

par Michel VENNETIER, François GIRARD, Cody DIDIER,
Samira OUARMIM, Christian RIPERT, Laurent MISSON, Roland ESTEVE,
Willy MARTIN et Aminata NDYAYE

Face aux nouvelles menaces liées au changement climatique (stress hydrique, nouveaux ravageurs...) les arbres doivent mettre en place différentes stratégies pour s'adapter. Dans cet article, les auteurs nous présentent les résultats les plus récents en matière d'adaptation phénologique, en prenant pour objet d'étude le pin d'Alep. Ils constatent ainsi plusieurs perturbations dans les cycles de croissance de cette espèce.

Introduction

La phénologie, point clef de l'écologie des plantes

La phénologie est la science ayant pour objet l'étude des phénomènes saisonniers qui marquent la vie des plantes et des animaux tout au long de l'année. Pour les plantes par exemple, il s'agit de l'apparition et de l'éclatement des bourgeons ; de la date de floraison ; des débuts et arrêts croissance des rameaux ; de l'apparition, du déploiement, du jaunissement et de la chute des feuilles ; de la formation, des changements de couleur, de la maturité et de la chute des fruits, etc. Les hommes ont, sans doute depuis la nuit des temps et pour des questions de survie lorsqu'ils étaient encore des chasseurs-cueilleurs nomades, fait la relation entre le climat et l'activité des plantes et animaux : arrivée ou départ des troupeaux d'herbivores, maturité des fruits à récolter, émergence des plantes médicinales. Mais ces relations ne sont pas toujours simples ni fiables sur le court terme : on sait bien qu'une hirondelle ne fait pas le printemps. C'est pourquoi le besoin d'observations régulières et sur le long terme, permettant de valider ou infirmer les savoirs populaires et de mieux comprendre ces relations, a émergé précocement. Dès 1875-80, le Service de la Météorologie française, les services forestiers et des jardins botaniques ont ainsi mis en place des réseaux nationaux de suivi phénologique destiné à fournir des indices à mettre

en relation avec les données météo. Ces réseaux ont malheureusement été abandonnés au milieu du XX^e siècle. Plus récemment, de nouveaux réseaux internationaux et nationaux ont été déployés dans le même objectif. En Allemagne par exemple, plus de 6000 stations d'observations sont suivies continuellement depuis 1951. En France, l'ensemble des réseaux d'observation, généralement récents (10 à 20 ans), ont été regroupés en 2006 dans un réseau scientifique et complétés par un réseau populaire, l'Observatoire des saisons (CHUINE, 2005a)

Si la phénologie des plantes est clairement liée au climat (DIFFERT, 2001 ; LEBOURGEOIS *et al.*, 2008), cette relation dépend de l'espèce, de sa variabilité génétique et de sa sensibilité à différents facteurs météorologiques : ainsi, certaines espèces dépendent plus de la pluie, d'autres de la température, certaines sont plus sensibles aux limites imposées par le froid en hiver ou par la chaleur au printemps. Pour une espèce donnée cette dépendance thermique peut varier en fonction de sa situation par rapport aux limites de son aire de répartition (MORIN *et al.*, 2007). La phénologie est donc un élément important de l'autécologie des espèces : elle a été à l'origine de nombreux essais d'amélioration génétique, par exemple pour sélectionner des variétés ou provenances dont la date de débourrement printanier est la plus adaptée aux probabilités de gels tardifs dans les différentes régions. Sur le réseau d'observation français RENECOFOR, LEBOURGEOIS *et al.* (2007) montrent les relations entre différentes variables climatiques et le comportement des principales espèces françaises. Par exemple pour les chênaies, la saison de végétation est plus courte de 30 jours à l'est et au nord de la France qu'à l'ouest et dans le sud : le débourrement est retardé de 2 jours par degré de longitude et le jaunissement intervient entre 5 et 10 jours plus tôt. La saison de végétation du hêtre est plus courte de 20 jours que celle du chêne sur les mêmes sites. Le débourrement des résineux retarde d'environ 1,5 jour par 100 m d'altitude et une augmentation de la température de 1°C en mars, se traduit par une précocité de 2 à 5 jours. Un des exemples les plus connus des relations climat/phénologie végétale concerne la maturité du raisin, traduite par la date des vendanges (DAUX *et al.*, 2007), pour laquelle on dispose de chroniques continues sur plusieurs centaines d'années, notamment en Bourgogne depuis 1370

(CHUINE, 2005b), et de nombreuses études régionales depuis 50 à 100 ans. Cette date, qui avance de 10 jours par degré de température gagné entre avril et août, quelle que soit la région, fait partie des indicateurs officiels suivis par l'ONERC (Observatoire national sur les effets du réchauffement climatique). Le trophée de la plus longue chronique revient au suivi de la floraison du *Prunus* à Kyoto (Japon) depuis le IX^e siècle!

L'allongement de la saison de végétation avec le réchauffement climatique, par avance du débourrement au printemps et retard de la fin d'activité ou de croissance, est évoquée comme une cause possible et parfois importante de l'accroissement de la productivité des forêts au cours du XX^e siècle (LEBOURGEOIS, 2005). Le pin d'Alep, qui est en France à la limite supérieure de son aire, n'échappe pas à cette règle (VILA *et al.*, 2008). Sa croissance en hauteur a fortement accéléré entre les années soixante et l'an 2000 (VENNETIER *et al.*, 1999).

Mais cet allongement de la saison de végétation n'est pas sans contreparties pour la santé et la phénologie des plantes. Un démarrage très précoce au printemps augmente le risque de dégâts sur les jeunes pousses en cas de gel tardif (MORIN *et al.*, 2007). En cas de phénomène récurrent, ces dégâts peuvent rendre la régénération de l'espèce difficile et donc limiter son aire effective de répartition. De plus, les vitesses de décalage du débourrement avec la température peuvent être très différentes d'une espèce à l'autre et notamment entre végétaux et animaux : les phases phénologiques entre plantes et symbiotes ou parasites peuvent ainsi se dissocier ou au contraire se synchroniser : floraison par rapport à la sortie des pollinisateurs, déploiement des feuilles par rapport à l'éclosion de chenilles défoliatrices, etc. Il a été par exemple émis l'hypothèse que le développement épidémique récent du chancre à *Crumelopsis* sur pin d'Alep (MARTINEZ, 2002) pouvait être lié au réchauffement du printemps qui favoriserait le développement plus précoce de ce champignon pathogène, à un moment où les conditions d'humidité et la fréquence des pluies sont plus élevées, donc plus favorables.

Enfin, les températures élevées en hiver peuvent avoir trois effets très négatifs sur le débourrement et la croissance des végétaux. D'une part, beaucoup d'espèces ont besoin d'une certaine quantité de froid en hiver (CHUINE *et al.*, 1999) pour lever une dor-

mance qui s'installe en automne. Cette dormance est nécessaire à la protection des tissus par grand froid. Le manque de froid peut ainsi retarder le débourrement (FALUSI *et al.*, 1996), ce qui contrebalance l'effet de températures élevées au printemps qui a tendance à l'accélérer. D'autre part, l'activité physiologique hivernale induite par des températures suffisamment douces oblige les arbres à mobiliser et utiliser des réserves, au prix d'une dépense d'énergie qui n'est pas compensée par la photosynthèse. Ces réserves ne sont plus disponibles au printemps, ce qui limite la vigueur des arbres, et peut les faire passer en dessous d'un seuil critique s'ils étaient déjà affaiblis. Enfin, les alternances de périodes froides et chaudes en hiver, conduisant à des à-coups dans l'activité physiologique, peut provoquer une cavitation dans les vaisseaux conducteurs (CRUIZIAT *et al.*, 2002), qui bien que réversible peut limiter la circulation de la sève au débourrement, et donc retarder celui-ci.

Objectifs de l'étude

Notre étude a cherché à décrire en détail la phénologie du pin d'Alep et sa variabilité interannuelle dans des placettes de forêt naturelle et dans un dispositif expérimental où la pluviométrie est contrôlée, avec deux objectifs principaux : (1) d'une part définir et situer temporellement les différentes phases de croissance et de développement de ce pin, pour lequel les connaissances étaient très lacunaires, et pour certains points inexistantes, (2), d'autre part comprendre les relations entre le climat et cette phénologie, afin de mieux prédire les effets potentiels du changement climatique.

Matériel et méthodes

Sites d'étude

Le site expérimental de Fontblanche (FB) est installé dans la forêt du même nom appartenant au Département des Bouches-du-Rhône (Cf. Fig. 1). Il représente le bioclimat moyen de la Provence, dans l'étage méso-méditerranéen. Les deux autres sites d'étude ont été choisis pour représenter respectivement les étages thermo-méditerranéen (Saint-Mitre-les-Remparts = SM), à basse altitude et proche de la mer, et supra-méditerranéen (Siou-Blanc = SB), en limite

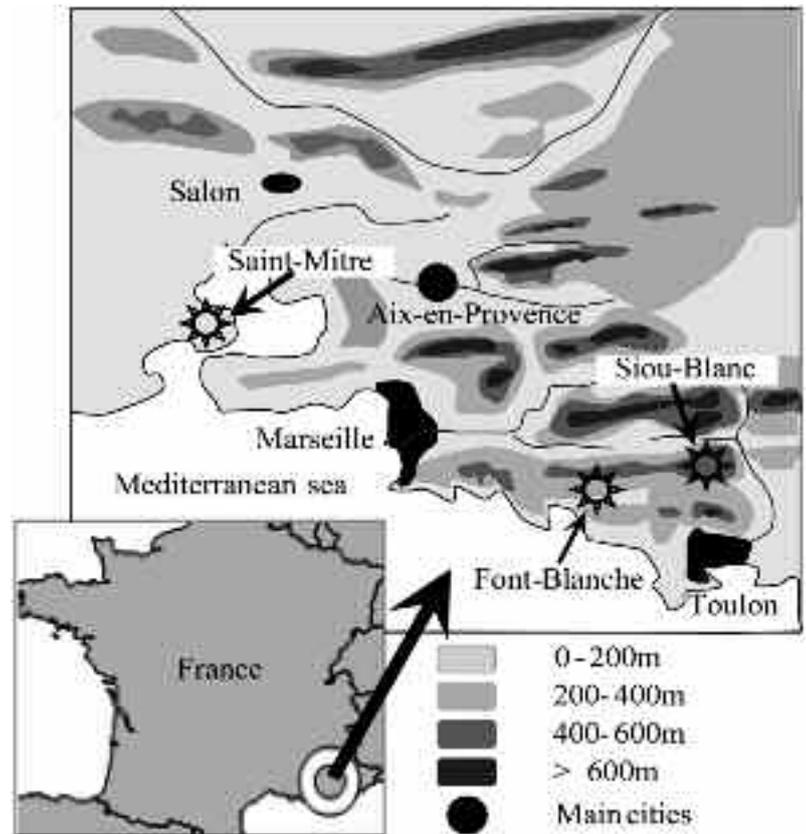


Fig. 1 : Sites d'étude

supérieure de l'aire du pin d'Alep. Les conditions stationnelles des trois sites sont très proches : pente faible (<5%), topographie plane, sol très caillouteux constitué d'une altérite peu profonde (10-25 cm) sur des bancs de roches carbonatées dures mais fissurées.

Les caractéristiques géographiques et climatiques de ces sites figurent dans le tableau I. Leur peuplement commun est constitué de bouquets de pins d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.) de 55 à 60 ans, dominant un taillis de chêne vert (*Quercus ilex* L.) et un sous-étage bas de chêne kermès (*Quercus coccifera* L.). S'y ajoutent à Fontblanche de la philaire à large feuille (*Phillyrea latifolia*

Tab. I : Description des trois sites d'étude

Site	Saint-Mitre	Fontblanche	Siou Blanc
Bioclimat méditerranéen	Thermo	Méso	Supra
Altitude (m)	120	400	600
Pluie annuelle (mm)*	551	721	826
Pluie d'été (juin-Août)*	65	87	102
Température moyenne (°C)	14.4	12.7	11.4
Nombre de mois secs	3	2	1
Hauteur des pins (55 ans)	12	13.5	15

* moyenne 1978 – 2008

L.) abondante et atteignant 2 à 4 m de haut, et quelques pins d'Alep plus âgés disséminés (90 à 120 ans). A Siou-Blanc, la philaire est aussi abondante et atteint 4 à 6 m, et quelques gros chênes blancs (*Quercus pubescens* Willd.) sont disséminés dans le taillis de chêne vert qui est plus dense et plus haut que sur les autres sites.

Le site de Fontblanche comprend 4 placettes expérimentales de 900 m² chacune (30x30m) : (1) une zone d'exclusion de 30% de la pluie à l'aide de gouttières suspendues à une armature métallique, et qui évacuent l'eau hors de la placette ; (2) une zone comportant les mêmes gouttières que l'exclusion, mais renversées afin de ne pas capter la pluie. Ce témoin permet de tenir compte de l'effet microclimatique des gouttières sur le sous-bois et le sol, qui existe dans l'exclusion ; (3) une zone irriguée par aspersion, recevant 30% de pluies supplémentaires par rapport aux apports naturels au printemps et en automne. L'irrigation s'arrête de fin juin à mi-août afin de respecter la sécheresse d'été naturelle du milieu méditerranéen ; (4) une zone témoin où aucun traitement n'est appliqué. L'exclusion et son témoin à gouttière renversées a démarré en décembre 2008, l'irrigation en fin d'été 2008.

Suivi phénologique

Sur le site de Fontblanche, des échafaudages ont été montés jusqu'à 9-12 m de hauteur en 2007-2008 dans les bouquets de pin d'Alep et chêne vert afin d'accéder à la cime des arbres. Les phases phénologiques ont été observées toutes les une à deux semaines du printemps à l'automne, tous les mois en hiver. Ont été notées les phases des bourgeons terminaux et rameaux des branches, des floraisons mâle et femelle, de la fructification (cônes) et des aiguilles suivant le protocole décrit dans le tableau II. Ces données ont été relevées sur 4 à 6 arbres par placette,

à raison de 2 à 5 branches par arbre en fonction de leur accessibilité, soit 10 à 14 branches par placette. Les branches ont été choisies en nombre égal dans les trois parties du houppier des arbres : haut, milieu et bas. Sur chaque branche, 5 rameaux ont été suivis : l'axe principal de la branche, et deux paires de rameaux secondaires âgées d'environ 5 et 10 ans respectivement au moment de l'installation du dispositif (un rameau fort et un faible par paire).

Analyse rétrospective des branches

Deux types d'analyses de branches ont été effectués sur les trois sites :

- des modules comprenant les trois à quatre dernières années de croissance ont été prélevés dans la cime des arbres en situation ensoleillée en février 2008, 2009 et 2010, afin de quantifier précisément la croissance et la productivité annuelle des différents organes (taille, nombre et biomasse des aiguilles, des rameaux, des cônes) et mesurer le polycyclisme, les ramifications, la durée de vie des aiguilles ;

- des paires (côtés nord et sud du houppier) de branches entières âgées de 15, 25 et 35 ans ont été prélevées de 2005 à 2010 sur 7 arbres par an à proximité immédiate des placettes de Fontblanche et de 2008 à 2010 pour les deux autres sites, sur des arbres poussant dans des conditions identiques. L'analyse de la croissance passée de ces branches sur 15 ans (nombre et longueur des cycles par an, taux de ramification, taux de floraison mâle ou femelle, nombre, taille et durée de vie d'aiguilles) a été effectuée à l'aide de marqueurs anatomiques : présence de ramifications, de cônes ou de leur pédoncule, taille et forme des écailles sur les tiges, cicatrices d'aiguilles et de fleurs). Sur chaque branche, cinq à sept axes ont été analysés : l'axe principal de la branche, deux paires

Tab. II :
Phases de développement et de sénescence des organes du pin d'Alep
Bourgeon terminal - pousses, Fleurs mâles, femelles, cônes, chute des aiguilles

Croissance des pousses/aiguilles	Floraison mâle	Floraison femelle
1 Dormance	1 Gonflement écailles	1 Apparition bouton floral
2 Bourgeon terminal gonflé	2 Différenciation boutons floraux	2 Gonflement bouton floral
3 Bourgeon terminal éclaté	3 Ouverture des fleurs mâles	3 Formation cônelet
4 Début croissance (pas d'aiguilles)	4 Sénescence (chute des fleurs)	4 Maturation cônelet (couleur)
5 Apparition des aiguilles		
6 Aiguilles jeunes déployées		
7 Aiguilles matures		

d'axes secondaires âgés de 5 et 10 ans environ, avec pour chaque paire un axe fort et un axe faible. Sur quelques branches, des axes tertiaires ont aussi été analysés (axes tertiaire de 5 ans sur l'axe secondaire fort de 10 ans). En cas de doute sur l'âge d'un axe, d'autres rameaux latéraux ont été datés et les cernes de croissance vérifiés à différents niveaux de l'axe.

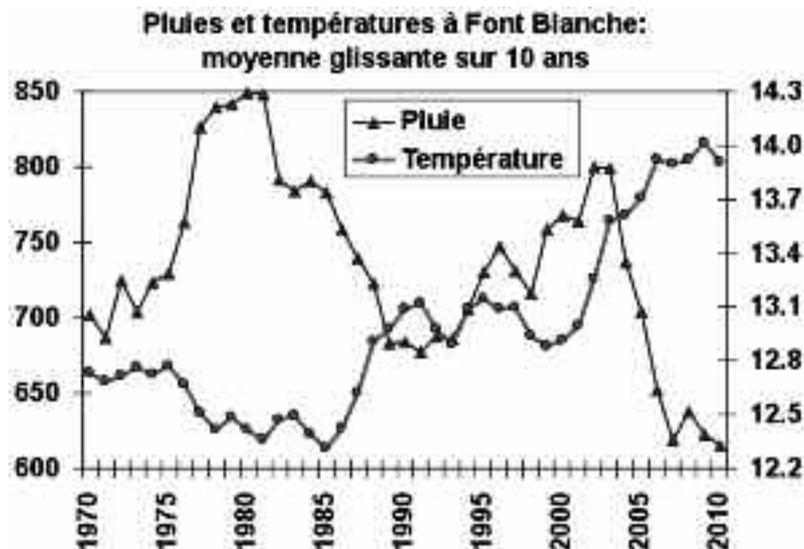
Evolution climatique

La zone d'étude a connu de 1998 à 2007 une très nette hausse de température moyenne (1.1 à 1.4°C), accompagnée d'une baisse significative des pluies de printemps (-18%) et d'été (-32%), par rapport à la normale des 30 ans précédents (Cf. Fig. 2). La canicule de 2003, qui a fortement endommagé les arbres (VENNETIER *et al.*, 2008) a de plus été suivie d'une série d'années extrêmement sèches (2004-2007), où les pluies cumulées des 8 premiers mois de l'année n'ont jamais dépassé 50% du total normal. Cette sécheresse a culminé en 2007 avec 270 à 310 mm sur l'année, ce qui en fait la 2^e année la plus sèche jamais enregistrée dans cette zone. Bien que les années 2008 et 2009 aient été plus arrosées globalement, la sécheresse estivale y a été forte et longue (4 mois). L'année 2010 a été plus favorable avec des pluies moins abondantes mais bien réparties jusqu'en juin et une très courte sécheresse d'été.

Résultats

Observations sur les phases d'activation des cycles de croissance

La différenciation de bourgeons latéraux pointant sur le côté du bourgeon de l'axe principal est un signe fiable de la formation dans ce dernier d'un futur cycle de croissance, et d'un début de développement. Ce stade peut se stabiliser durant plusieurs mois si les conditions de croissance ne sont pas favorables (été, hiver ou sécheresse). En absence de ramification, il est moins facile de déterminer la date de formation de ce cycle. Le gonflement du bourgeon et l'apparition d'une portion de tige entre le bourgeon terminal et les ramifications à sa base, ou les dernières aiguilles, témoignent du démar-



rage réel de la croissance. Si la pousse doit porter des fleurs mâles, le gonflement du bourgeon terminal commence par un épaississement des écailles de sa base, chacune de ces écailles devenant progressivement un bouton floral différencié. Il n'y a alors pas d'espace libre à la base du cycle, les boutons occupant toute la longueur de la tige au fur et à mesure de son allongement jusqu'à la floraison.

Fig. 2 : Evolution de la pluie et de la température à Fontblanche, en moyenne glissante sur 10 ans. L'année en abscisse correspond à la fin de la décennie concernée.

Décalages phénologiques et nombre de cycles

La figure 3 montre le décalage observé au cours des dernières années (2008-2010) dans les phases de croissance du pin d'Alep.

D'après l'ensemble des flores et études antérieures, le premier cycle de croissance annuel démarre en février-mars (SERRE, 1976). Ce démarrage a été récemment observé dès l'année précédente, entre fin

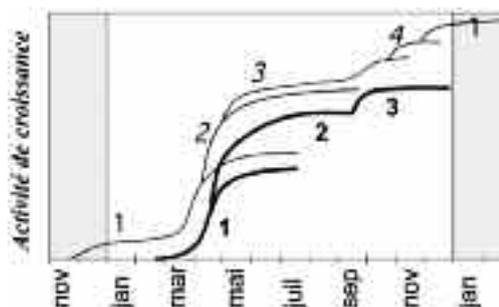


Fig. 3 : Décalage phénologique des phases de croissance des rameaux vigoureux de pin d'Alep. En ligne épaisse, développement normal avec bicyclisme de printemps et cycle supplémentaire en début d'automne. En ligne fine, développement observé avec des hivers et automnes très chauds (2009, 2010). Les chiffres indiquent les numéros de cycles de croissance.

novembre et mi-décembre. Cette première phase hivernale d'allongement est courte (de quelques millimètres à quelques centimètres) et lente. Suivant les années, elle a marqué ou non une pause en plein hiver (janvier-février) avant de reprendre une croissance accélérée en mars. En 2009 et 2010, la croissance hivernale s'est accompagnée de l'apparition très précoce de boutons floraux mâles.

La deuxième pousse commence son développement deux à trois semaines après la première au printemps (normalement fin mars ou début avril). L'élongation des deux cycles est ensuite simultanée. Elle se poursuit jusqu'à être arrêtée par la sécheresse d'été (fin juin). Au cours des dernières années, ce deuxième cycle a été très précoce. Souvent déjà apparent sur les bourgeons du premier cycle dès l'hiver, il a commencé son développement entre mi et fin mars.

Une troisième pousse peut apparaître normalement en automne quand le printemps a été suffisamment arrosé, l'été pas trop sec et quand des orages ont réhumidifié le sol précocement (fin août ou début septembre). Elle donne des aiguilles courtes et peu nombreuses. Si les deux premières pousses sont précoces et les conditions favorables, ce qui s'est produit de 2008 à 2010 et dans la placette irriguée, ce troisième cycle peut débuter dès le printemps entre mi-avril et juin. Sa croissance est d'autant plus forte qu'elle débute précocement et accompagne celle des deux pousses précédentes. Dans ce cas, elle peut marquer un temps d'arrêt en été et reprendre en automne. Ses aiguilles, bien que plus petites que celles des deux premiers cycles (elles démarrent leur croissance plus tardivement), sont cependant entièrement développées en automne car elles poursuivent leur croissance en été. Si le troisième cycle débute tardivement (juin) la pousse reste faible (quelques centimètres) et s'arrête définitivement en été, avec des aiguilles très courtes et pas entièrement développées. On ne peut pas dans ce cas différencier a posteriori un 3^e cycle de printemps d'un cycle d'automne. Un cycle d'automne peut apparaître comme bicyclisme sur des pousses n'ayant réalisé qu'un cycle de printemps, mais c'est rare.

Un cycle très tardif et incomplet (pas d'aiguilles) a été observé en 2009 et 2010 entre octobre et début décembre, moins abondamment en 2008. Une particularité de ces cycles tardifs est qu'ils peuvent avoir deux compor-

tements différents : une partie d'entre eux s'arrête en décembre. Ils font alors généralement entre 5 et 20 mm de long, donnant naissance à un nouveau bourgeon terminal qui se développera comme premier cycle du printemps suivant ; d'autres, après une pause plus ou moins nette, reprennent leur croissance directement comme premier cycle de printemps. Il est donc impossible, au démarrage d'un cycle tardif, de prédire s'il s'agit du dernier cycle de l'année en cours ou du premier de l'année suivante. En 2009 et 2010 à Fontblanche, sur les axes principaux et sur les axes secondaires vigoureux des branches, ce cycle tardif a concerné respectivement 50%, 80% et 100% des rameaux jusque-là monocycliques, bicycliques et tricycliques. Dans ce dernier cas, on aboutit finalement à du quadricyclisme. En 2009, un cas de branche portant 5 cycles, dont un tardif a été mesuré dans notre échantillon. Ce type de comportement a été observé simultanément dans la cime des arbres mesurés, sur les axes principaux du tronc et des branches les plus élevées et vigoureuses. Le quatrième cycle était déjà apparu fin juin (quelques millimètres) et il a fini sa croissance en début d'automne, avant l'apparition tardive du cinquième cycle en novembre. Ce dernier cycle est dans ce cas plus long (20-40 mm), en rapport avec la vigueur des axes concernés. Quelques cas de quadricyclisme tardif sur des branches vigoureuses ont donné lieu à l'apparition de deux cônes successifs au printemps : l'un sur le cycle tardif ayant débuté sa croissance l'année précédente, l'autre sur le cycle s'étant allongé seulement au printemps mais déjà formé l'année précédente (bourgeons latéraux différenciés).

Nous avons noté en 2008 et 2009 que certains rameaux ayant produit des fleurs mâles au printemps ont fait un polycyclisme tardif en automne.

Apparition hivernale des fleurs mâles

Le climat particulièrement chaud des derniers automnes a provoqué l'apparition et le développement des boutons floraux mâles des pins en plein hiver : janvier 2009 pour la floraison d'avril 2009 et décembre 2009 pour la floraison de 2010. En décembre 2009, les boutons étaient déjà bien gonflés (diamètre de 1 à 3 mm). En février 2008, ces boutons n'étaient pas développés. Des boutons flo-

raux étaient déjà apparus mi-décembre 2010 dans la placette irrigation, et une activité des bourgeons terminaux semblant préparer ces boutons floraux (gonflement à la base) était observée à la même date dans les placettes témoin, à un degré beaucoup moindre dans l'exclusion. Fin janvier 2011, les boutons floraux étaient pleinement développés dans la placette irriguée, avec une croissance avancée des pousses (5-15 mm), et ils étaient différenciés et en cours de gonflement dans les autres placettes.

La floraison mâle a été de plus en plus abondante entre 2007 et 2010, en proportion de rameaux fleuri comme en nombre de fleurs par rameau traduit par la longueur de la zone fleurie. Elle est passée de 20-30% des rameaux et 2 à 5 mm de longueur à 60-70% et 8-15 mm. Le gain en pourcentage s'est fait à la fois en multipliant les rameaux fleuris sur chaque branche du milieu et du bas du houppier, et en remontant de plus en plus haut dans le houppier. L'exclusion a fortement réduit ce taux de floraison qui a atteint 38% en 2009, comme le témoin, mais est retombée à 35 % en 2010. L'irrigation a augmenté le taux de floraison mâle qui a atteint 63% et 15 mm dès 2009 et s'y est maintenu en 2010.

Mortalité de branches, rameaux et cônes

Un fort taux d'avortement de branches et rameaux a été noté depuis 2003.

Une partie de ces mortalités sont directement liés à l'affaiblissement des arbres au cours de la période 2003-2007 : elles ont été surtout estivales ou automnales et ont touché les rameaux faibles et les branches basses, notamment celles qui avaient été fortement pliées par une neige lourde en 2001. Elles se sont accélérées depuis 2008 sur les branches basses, commençant par un jaunissement généralisé en fin de printemps.

Une autre partie a touché les axes principaux vigoureux du milieu ou du haut du houppier qui ont donné des cônes. Ces axes ont fortement ralenti leur croissance derrière les cônes, au point de perdre leur dominance et même fréquemment de mourir, le taux d'avortement des cônes eux-mêmes (50-80%) ayant été très élevé. La mortalité des jeunes cônes a baissé depuis 2008, tout en restant significative (20-40%).

Enfin, la mortalité est parfois directement liée à la multiplication de cycles très tardifs et même hivernaux. Une partie de ces pousses actives en hiver a été détruite par les rares coups de gel, et une autre par des champignons au printemps, sans doute en raison de lésions tissulaires.

Chute des aiguilles

Au cours des années d'observation détaillée (2007-2010), un jaunissement quasi-généralisé des aiguilles de 2 ans s'est produit en juillet, suivi de leur chute en juillet-août. Sur des rameaux faibles, environ 20% des aiguilles ont survécu un an de plus, exceptionnellement quelques-unes sur des rameaux forts. Uniquement sur les rameaux faibles, 5% des aiguilles ont survécu 4 ans.

Effets de l'irrigation et de l'exclusion de pluie

(Cf. Fig. 4 et 5)

L'exclusion a eu des effets sur la phénologie au bout d'un an environ et l'irrigation dès le premier automne, ces effets s'étant accentués en deuxième année.

La placette exclusion présente en 2009 un retard déjà significatif dans les dates de débourrement (15-30 jours) et d'apparition des aiguilles (10 à 15 jours) et dans le développement printanier, d'autant plus marqué que les rameaux sont faibles. Une avance du

Photo 1 :

Les gouttières retournées sur la zone témoin : ce témoin permet de tenir compte de l'effet micro-climatique des gouttières sur le sous-bois et le sol, qui existe dans l'exclusion
Photo DA



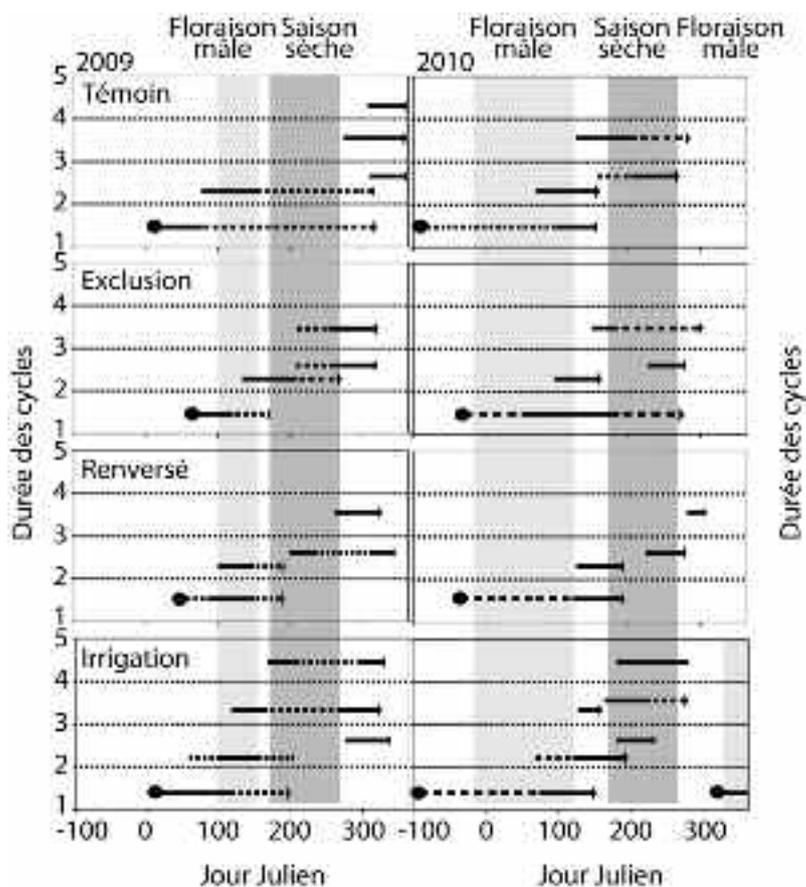


Fig. 4 :

Élongation des unités de croissance du pin d'Alep pour les années 2009 et 2010 dans les quatre placettes expérimentales de Font-Blanche. Les périodes de floraison mâle et de sécheresses estivales sont représentées par des bandes grises. Les lignes continues représentent les périodes de croissance active, les lignes discontinues représentent les périodes de croissance ralentie, tandis que les points représentent le début de la saison de croissance. Lorsqu'il y a deux phases indiquées pour le même cycle, c'est que suivant les branches le cycle a été soit précoce (printanier) soit plus tardif (estival ou automnal). En 2010, en raison de pluies abondante jusque fin juin, une croissance active a été observée exceptionnellement durant l'été.

même ordre est observée sur l'arrêt d'activité en automne. Au printemps 2010, une majorité des branches vigoureuses et principales de l'exclusion a plus de 30 jours de retard sur le débourrement et 15 jours sur le développement des aiguilles, ce débourrement s'étalant sur près de 4 mois. Sur les axes faibles, peu de pousses ont débourré avant mars, soit déjà 3 mois de retard par rapport au témoin, et beaucoup n'ont commencé leur croissance qu'en avril. Sur les deuxièmes cycles apparus au printemps, la moitié ont arrêté leur croissance après quelques millimètres et n'ont développé une pousse et des aiguilles

très petites qu'en juin, ou même pour un tiers d'entre elles en automne.

Dans la placette irriguée, il n'y a pas d'avance significative au débourrement par rapport au témoin fin 2008 pour 2009, et il y a même un petit retard fin 2009 pour les futures pousses 2010 sur les axes forts et principaux. Ce retard est dû au fait que les pousses de la placette irriguée ont souvent fait un cycle supplémentaire d'automne dont la croissance s'est terminée plus tard que le dernier cycle 2009 du témoin. En revanche, ce retard a été très rattrapé dès fin décembre.

Dans la placette d'exclusion, les cycles apparus dans l'été et ayant poussé en automne ont souvent repris leur croissance comme premier cycle de printemps, presque aucun de ces cycles n'ayant été doublé par un cycle tardif. Dans l'irrigation au contraire, et plus que dans le témoin, les deuxièmes ou troisièmes cycles apparus en fin de printemps ou en été et ayant achevé leur croissance en automne, ont donné naissance à un cycle tardif entre fin septembre et décembre, ce dernier ayant poursuivi sa croissance comme premier cycle de printemps.

Dans la placette à gouttières renversées, il n'y pas eu pour 2009 de débourrement hivernal fin 2008, contrairement au témoin et à l'irrigation. L'allongement n'a commencé que début mars mais de façon très groupée sur tous les axes. Fin 2009, ce débourrement anticipant la pousse de 2010 a été en moyenne plus tardif par rapport au témoin et plus étalé dans le temps, un tiers des axes ne débourrant qu'en mars 2010. Les axes faibles ont tous débourré très tardivement en mars 2010 mais, là encore, de façon très groupée.

En 2010, le polycyclisme a été plus précoce (8-15 jours) et deux fois plus fréquent au printemps dans l'irrigation que dans le témoin. Le polycyclisme tardif a été un peu plus abondant (+10%) que dans le témoin, il a démarré 15 jours plus tôt et a donné des pousses deux fois plus longues en moyenne (15 mm au lieu de 7 mm). A l'opposé dans l'exclusion, les cycles sont moins nombreux, apparaissent plus tardivement (10-15 jours) et ont une durée d'activité réduite quelle que soit la saison. Le polycyclisme reste à des niveaux très faibles avec les gouttières renversées et apparaît au printemps avec 15 jours de retard sur le témoin.

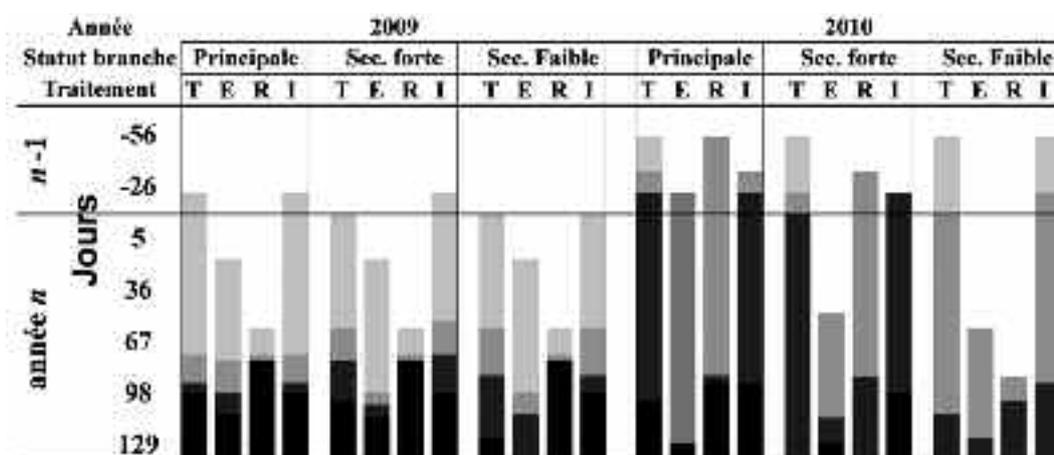


Fig. 5 (ci-contre) : Précocité et intensité du débournement en fonction du traitement. T = témoin, E = exclusion de pluie, R = gouttières renversées, I = irrigation, Sec. = rameau secondaire. Le gris clair, moyen et foncé et le noir correspondent respectivement à 4 classes de pourcentages de débournement de 1 à 50%, 50 à 80%, 81 à 99% et 100%.

Effet du gradient climatique le long du transect

D'après l'analyse rétrospective de branches sur les 15 dernières années (Cf. Fig. 6), le taux de polycyclisme a diminué fortement à Saint-Mitre et un peu moins à Fontblanche. C'est au cours de la difficile période 2004-2007 que le phénomène s'est accentué, même s'il semble avoir commencé un peu avant à Fontblanche. Dans le même temps, ce taux a légèrement augmenté à Siou-Blanc, essentiellement depuis 2003.

Des cas de quadricyclisme long (30-60 mm) et portant parfois les cicatrices d'aiguilles, ont été notés dans l'analyse des branches sur les trois sites d'étude (Cf. Tab. III). La fréquence de ces événements est très variable d'une année à l'autre : ils concernent en moyenne 5% des axes principaux des branches de Saint-Mitre et Siou-Blanc dans les années 95-99 (de 0% à 12% maximum). Par la suite et jusqu'en 2008, ce taux tombe très bas, dès 2000 pour Siou-Blanc, et à partir de 2004 pour Saint-Mitre. Fontblanche suit un chemin inverse : le taux de quadricyclisme apparent est très faible ou nul jusqu'en 2005 (moyenne 0,5%, maxi 1%) et augmente ensuite régulièrement de 2006 à 2008, respectivement 2%, 4%, 10%.

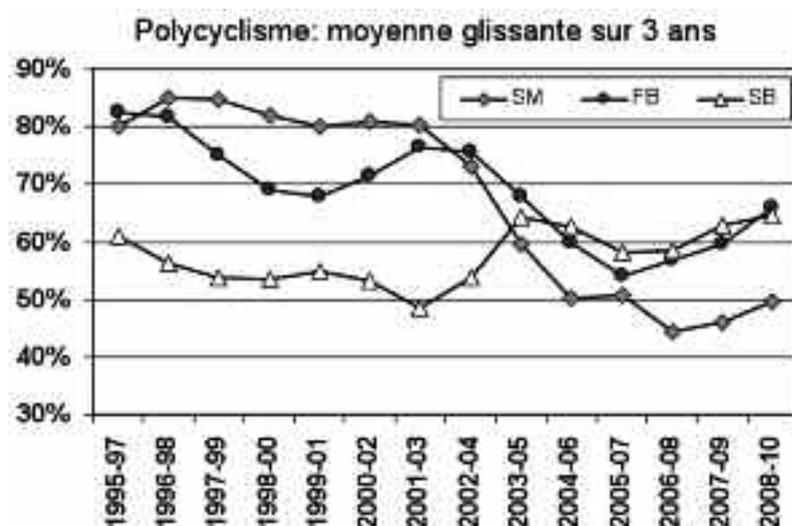


Fig. 6 (ci-dessus) : Evolution du taux de polycyclisme dans les trois sites d'étude de 1995 à 2008, en moyenne glissante sur 3 ans.

Tab. III : Evolution du tri et quadricyclisme dans les trois sites d'étude par périodes

	Tricyclisme			Quadricyclisme		
	SM	FB	SB	SM	FB	SB
1995-99	33.4%	28.9%	28.0%	5.2%	0.7%	4.6%
2000-03	20.0%	25.0%	4.1%	5.4%	0.4%	0.8%
2004-08	10.5%	13.3%	10.3%	1.1%	2.5%	0.2%
2007	7.7%	8.6%	3.3%	0.0%	5.7%	0.0%
2008	21.4%	14.7%	16.7%	0.0%	11.8%	0.0%
2009	31.3%	35.3%	6.3%	12.5%	5.9%	0.0%

A partir des modules prélevés sur la cime des arbres, on observe une reprise irrégulière du quadricyclisme depuis 2007 à Saint-Mitre et Fontblanche, mais pas à Siou-Blanc. Mais la moitié de ces cas récents sont des cycles très courts (<10 mm), qui n'auraient pas été lisibles sur des rameaux de plus de 10 ans.

Les tendances pour le tricyclisme sont indiquées dans le tableau III. Les tendances sont à la baisse entre 1995 et 2007 pour les trois sites, mais plus tardivement pour Fontblanche. Une forte reprise est ensuite observée de 2007 à 2009 à Saint-Mitre et Fontblanche, mais pas à Siou-Blanc.

Comme pour le quadricyclisme, le taux de troisièmes cycles tardifs de petite taille augmente fortement dans les dernières années, par rapport à des troisièmes cycles longs et porteurs d'aiguilles plus fréquents précédemment.

Discussion

Les effets de la température

L'absence de recul sur la phénologie du pin d'Alep ne permet pas d'espérer voir une tendance temporelle dans les dates de débourrement ou de floraison. Sur les échantillons de pin d'Alep de l'herbier de l'Université de Provence, tous ramassés avec des boutons floraux bien développés entre 1834 et 1921, les dates de récolte varient du 5 au 30 avril, ce qui concorde avec nos observations sur Fontblanche où la pleine floraison s'est produite dans la deuxième moitié d'avril de 2008 à 2010. L'avancement du débourrement ou de la floraison pour la plupart des espèces végétales étant de l'ordre de une à deux semaines sur les 4 à 5 dernières décennies, soit du même ordre de grandeur que la variation interannuelle, il faudra des observations longues pour tirer des conclusions.

Comme le froid est un facteur limitant principal de la croissance du pin d'Alep (DEVAUX *et al.*, 1978 ; RIPERT *et al.*, 2001), on peut cependant imaginer qu'au cours des 50 dernières années la date de débourrement au printemps et de floraison ait avancé significativement. La facilité avec laquelle le pin d'Alep semble tirer parti de périodes chaudes en hiver, comme nous l'avons constaté dans ce travail, plaide pour cette hypothèse. De

même, les études dendroécologiques sur le pin d'Alep (RATHGEBER, 2002 ; RATHGEBER *et al.*, 2005 ; VILA *et al.*, 2003) montrent que des températures élevées en février sont corrélées à des cernes de croissance larges, témoins du démarrage précoce de l'activité cambiale allongeant la saison de végétation printanière.

Mais par rapport à des espèces monocycliques ou décidues, le polycyclisme du pin d'Alep complique les interactions entre croissance et climat. En effet, ce n'est plus simplement au printemps que se joue le débourrement : si les premiers cycles annuels apparaissent dès le début de l'hiver, ce n'est pas que la précocité des printemps, mais aussi la longévité des automnes, qui en est la cause. La conjonction de ces deux décalages permet au pin d'Alep une croissance potentiellement continue sur toute l'année. Même si elle est ralentie en hiver, cette croissance est significative sur les axes principaux et vigoureux : elle peut atteindre plusieurs centimètres entre novembre et février, et on a vu qu'elle aboutissait au développement avancé des boutons floraux. A notre connaissance, une telle activité hivernale n'avait pas été décrite chez le pin d'Alep ni d'autres pins méditerranéens en milieu naturel. PARDOS *et al.* (2003) avaient observé une croissance débutant en janvier sur 15% de branches de pin d'Alep greffés en verger à graines irrigués toute l'année dans le sud de l'Espagne. On se situait donc dans des conditions plus chaudes (15,4°C de température moyenne annuelle) que celles de Provence et en milieu totalement artificialisé. Dans ce verger, la plupart des croissances débutaient en février ou mars et toutes se terminaient entre mi et fin octobre. Des cycles tardifs de faible longueur (1-2 cm) étaient apparus sur certains clones, mais les plus tardifs dès fin août. Les boutons floraux mâles étaient déjà repérables fin janvier, indiquant une apparition précoce, mais ne se sont développés qu'en mars. Une floraison ou une croissance en décembre n'auraient pas pu échapper à l'observation dans ce dispositif suivi continuellement.

Si un cycle tardif s'est arrêté en hiver et est resté très court, il n'est détectable dans l'anatomie de la branche que pendant quelques années après sa formation. Même si ce cycle tardif et le précédent ont produit des axes latéraux, ces derniers se confondront en un même verticille avec leur croissance en diamètre. Si la pousse qui a

démarré en fin d'année [n-1] a poursuivi sa croissance tardive au printemps de l'année [n], elle sera a posteriori classée comme première pousse de l'année [n]. On ne peut donc pas affirmer que le phénomène de croissance hivernale soit nouveau, car il a pu passer inaperçu dans le passé, et s'il s'est produit dans les années 90, il n'a pas pu être détecté dans notre analyse rétrospective des branches.

Le pin d'Alep n'est pas le seul concerné par l'apparition d'une croissance hivernale. Durant l'hiver 2010, nous avons noté de tels polycyclismes tardifs courts chez le pin maritime, lui-même polycyclique, mais aussi chez deux espèces réputées monocycliques à l'âge adulte : le pin sylvestre et le pin pignon.

L'activité hivernale du pin d'Alep a eu des conséquences négatives sur sa croissance : malgré l'intérêt des cycles tardifs pour accroître le nombre de ramification, et donc la future surface foliaire potentielle, les avortements par dégâts de gel et attaques parasitaires sur ces jeunes pousses ont fait perdre un temps précieux au printemps, obligeant à repartir sur des axes inférieurs et moins vigoureux. Il s'agit de plus d'un gaspillage de ressources. Si ces dégâts ont été malgré tout relativement supportables car disséminés au cours des 10 dernières années, et limités à la cime des arbres, il n'en serait sans doute pas de même en cas de gel exceptionnel. En 1956, les plus gros dégâts ont été observés sur des arbres qui étaient en plein débourrement début février après une fin d'hiver trop chaude (DEVAUX *et al.*, 1978). Un tel incident, ou même un froid identique à celui de 1985 en janvier, décimerait sans doute les houppiers des pins couverts de jeunes pousses en activité. Il détruirait peut-être totalement la floraison mâle si les boutons étaient à un stade avancé de gonflement, comme observé de 2009 à 2011.

Le démarrage très précoce de la croissance au printemps permet durant les bonnes années de faire un cycle supplémentaire avant l'été. On a vu ainsi de nombreuses pousses vigoureuses du témoin et même des axes secondaires dans la placette irriguée produire un troisième cycle dès juin et même un cas de quadricyclisme démarré fin juin en 2009. Chaque cycle supplémentaire accroît non seulement la longueur des axes, donc la croissance en hauteur, mais aussi le nombre de ramifications, et donc la surface foliaire potentielle produite les années suivantes. En



Photo 2 :
Michel Vennetier (Cemagref) explique, sur le site de Fontblanche, les différentes phases de croissance d'un rameau de pin d'Alep. (AG de Forêt Méditerranéenne, octobre 2009)
Photo DA

absence de stress hydrique majeur, le réchauffement est donc favorable à la croissance du pin d'Alep. L'apparition d'un polycyclisme d'automne fréquent sur les rameaux ayant donné des fleurs mâles au printemps est aussi une surprise relative, le phénomène n'ayant pas été décrit jusque-là. On peut penser que ce phénomène est lié à la floraison massive observée récemment, qui concerne non seulement des rameaux faibles et branches basses mais aussi des branches et rameaux relativement vigoureux jusqu'en haut des houppiers, ces derniers étant plus enclins au polycyclisme (GIRARD *et al.*, 2010). Cette floraison mâle pléthorique est sans doute liée à l'affaiblissement global des arbres après la longue période de sécheresse, combiné avec le léger mieux ressenti depuis 2008. Cette amélioration, tout en permettant un investissement important dans la reproduction, est encore insuffisante pour produire de grandes quantités de fleurs femelles.

Effet des précipitations

Les sécheresses d'été longues et dures retardent le développement des cycles d'automne, comme le montre la baisse du polycyclisme et notamment du tri et quadricyclisme au cours des années difficiles de 2003 à 2007 à Saint-Mitre et Siou-Blanc et les résultats de la placette d'exclusion de pluie.

Même lorsque ces cycles apparaissent en fin de printemps, leur croissance ne démarre alors qu'en octobre et seulement à conditions que les températures soient suffisamment élevées. Le réchauffement des automnes depuis 1998 leur permet de s'allonger mais pas d'achever leur développement faute de temps. Dans l'irrigation, leur croissance a été stoppée précocement par rapport au témoin. Bien que produisant des ramifications, ces pousses ne portent pas d'aiguilles. L'investissement de la plante n'est donc pas entièrement rentabilisé, d'autant que ces pousses tardives peuvent être endommagées par l'hiver. La légère amélioration du polycyclisme à Siou-Blanc depuis 2003 semble indiquer qu'au dessus de 600 m d'altitude, où les excès de température ont été limités, le déficit pluviométrique a eu moins de conséquence sur la phénologie. Cependant, l'étude des autres paramètres de croissance et d'architecture à Siou-Blanc indique clairement que les arbres ont fortement réduit leur croissance et leur développement, notamment l'allongement des branches, le nombre de ramification et le nombre d'aiguilles formées par année (DIDIER, 2010). Le pin d'Alep n'a donc nulle part en Provence échappé aux dégâts causés par l'élévation de température combinée à des sécheresses répétées.

Des précipitations limitées diminuent donc significativement la longueur de la saison de végétation, qui démarre plus tard et se termine plus tôt. Le développement des cycles de croissance (notamment des aiguilles) est lui-même ralenti et retardé. Des pluies abondantes et une sécheresse limitée en été ont l'effet inverse, comme le montre la placette irriguée.

L'exclusion de pluie a considérablement étalé dans le temps les différentes phases phénologiques, et en particulier le débourrement et en partie le développement des aiguilles. Ce phénomène est visible entre rameaux de même vigueur. Il est encore plus fort entre rameaux forts et rameaux faibles ; ces derniers ayant parfois un à deux mois de retard sur les pousses vigoureuses. En 2010, de nombreux rameaux faibles n'ont même pas du tout terminé au printemps le développement de leur premier cycle, et jamais, même en automne, celui d'un éventuel deuxième cycle. L'arbre en déficit de ressource semble donc favoriser les rameaux les plus vigoureux en sacrifiant les plus faibles. Cela pourrait expliquer la forte mortalité de rameaux faibles et branches basses observée

dans l'ensemble des placettes entre 2008 et 2010, qui sont sans doute une conséquence du déficit hydrique prolongé des années précédentes.

Le microclimat créé par les gouttières renversées a produit l'effet inverse en homogénéisant les périodes de débourrement et développement, tout en retardant le débourrement. L'homogénéisation peut être une réponse à l'accroissement de la disponibilité de l'eau dans le sol dû à la réduction de l'évaporation, et le retard de débourrement une réponse au microclimat plus frais créé par les gouttières, qui a pu ralentir au printemps l'activité biologique du sol, et donc des racines.

Interaction pluies-température

Il y a une forte interaction entre pluie et températures dans la réponse du pin d'Alep au changement climatique. Des pluies abondantes accroissent l'effet favorable de la hausse des températures, en permettant une croissance prolongée donnant des cycles supplémentaires au printemps et en automne. Inversement, des pluies limitées ou simplement normales combinées avec une hausse de température accentuent fortement le stress hydrique estival, qui se traduit par une croissance et un nombre de cycles réduits. Or les scénarios climatiques prédisent unanimement pour la région méditerranéenne une augmentation très importante de la température couplée à une baisse des précipitations (HESSELBJERG-CHRISTIANSEN *et al.*, 2007). L'épisode 1998-2007, et particulièrement la période 2003-2007, où la température a dépassé de plus de 1°C la moyenne des 30 années précédentes, et où la pluie a été très déficitaire, étaient une bonne répétition générale, et sans doute encore assez clémente, du climat qui attend le pin d'Alep en Provence au milieu du XXI^e siècle. Les dégâts à l'ensemble de l'écosystème, et aux arbres en particulier, ont été considérables (GIRARD *et al.*, 2010 ; VENNETIER *et al.*, 2010a ; VENNETIER *et al.*, 2010b ; VENNETIER *et al.*, 2010c). Il est donc probable qu'après une accélération de sa croissance au XX^e siècle, le pin d'Alep subira une inversion de cette tendance dans les décennies à venir. La phénologie confirme ainsi ce que prédisent les modèles dendroécologiques (VENNETIER *et al.*, 2006).

Morphogénèse des cycles de croissance

La multiplication des cycles de croissance durant une année donnée pose la question de la morphogénèse de ces cycles. En effet, la floraison du premier cycle est prédéterminée dans le bourgeon terminal qui lui donnera naissance (CANNELL *et al.*, 1976). Mais l'arbre ne peut anticiper au débourrement, ni en fin d'été, le nombre de cycle qu'il pourra développer durant une année sur un rameau déterminé. Cela dépend fortement du climat de cette année. Il est donc vraisemblable que ce sont les conditions combinées de température et de durée du jour en automne qui induisent la formation du cycle florifère dans le bourgeon terminal. Il n'est pas possible qu'un tel cycle transmette cette capacité de floraison au suivant s'il devait être utilisé précocement. C'est sans doute ce qui explique les floraisons mâles hivernales récentes : les cycles anatomiquement programmés pour le printemps (LANNER, 1976) se sont développés dans le bourgeon terminal en automne, mais les températures anormalement élevées de novembre et décembre et la photopériode mimant les conditions de fin d'hiver ont provoqué le débourrement prématuré de ces cycles. Le cas de floraison femelle sur deux pousses successives au printemps pourrait avoir la même explication : induction d'une première fleur femelle sur un cycle programmé en automne pour le printemps suivant mais dont la croissance a démarré immédiatement, suivie par l'induction d'une deuxième fleur sur le cycle préformé dans le bourgeon terminal en décembre.

La complexité des interactions entre formation anatomique des cycles dans le bourgeon terminal et prédestination de ces cycles par les conditions externes peut, quant à elle, expliquer le destin différent des cycles d'automne : certains arrêtent définitivement leur croissance pour donner naissance à un nouveau cycle, d'autres marquent juste un arrêt ou un ralentissement avant de redémarrer au printemps. Pour les premiers, il peut s'agir de bourgeons terminaux contenant deux cycles potentiels formés en début d'été ou fin de printemps, et dont le plus ancien sera destiné à l'automne et le plus récent configuré pour le printemps suivant. Le deuxième cas est plus difficile à expliquer. Il pourrait s'agir de cycles peu vigoureux que les températures trop hautes ne

conduisent pas à s'arrêter et ni à préparer en l'automne le cycle printanier suivant. Logiquement, ces pousses ne devraient pas porter de fleurs mâles. Ce comportement ouvre la voie à un dérèglement potentiel de la phénologie. Une observation au microscope de l'anatomie interne des bourgeons terminaux de rameaux ayant des comportements différents permettrait de déterminer le nombre de cycles préprogrammés à chaque saison. On connaîtrait mieux ainsi la plasticité potentielle et l'adaptation du polycyclisme du pin d'Alep au changement climatique.

Conclusion

Au niveau de la phénologie, le réchauffement climatique se traduit chez le pin d'Alep essentiellement par quatre phénomènes liés : (1) un décalage temporel du démarrage et du développement des cycles de croissance normaux qui, à cause de températures élevées, peuvent être au printemps de plus en plus précoces et en automne de plus en plus tardifs ; (2) l'apparition de cycles supplémentaires très tardif en novembre ou décembre, qui pour la plupart poursuivront leur développement comme premier cycle de printemps l'année suivante ; (3) un retard au développement des cycles d'automne à cause de stress hydriques et thermiques excessifs ou prolongés en été, ces cycles n'arrivant pas à terminer leur développement avant l'hiver, et restant sans aiguilles ; (4) une activité de croissance significative en hiver, allant jusqu'au développement des boutons floraux dès décembre.

Un accroissement du déficit hydrique pousse les arbres à favoriser les axes dominants dans l'accès aux ressources, au détriment des plus faibles, étalant le débourrement sur une plus longue durée. Un accroissement des pluies semblent homogénéiser la phénologie au sein du houppier, la différence entre rameaux forts et faibles étant moins importante.

Remerciements

Les auteurs remercient Frédéric Faure-Brac, Asier Herrero et Maël Grauer, stagiaires qui ont contribué à la récolte et aux analyses de données,

Michel VENNETIER^{1,2}
François GIRARD¹
Cody DIDIER¹
Samira OUARMIM^{1,3}
Christian RIPERT¹
Laurent MISSON⁴
Roland ESTEVE¹
Willy MARTIN¹
Aminata NDYAYE¹

(1) GR Ecosystèmes Méditerranéens et Risques, Cemagref, Aix en Provence

(2) Fédération de recherche ECCOREV, Aix-en-Provence

(3) UQUAT- Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue

(4) Centre d'Ecologie Fonctionnelle et Evolutive (CEFE), CNRS, Montpellier

Mél :
michel.vennetier@cemagref.fr

ainsi que Régine Verlaque et Bruno Vila, responsables de l'herbier de l'Université de Provence qui ont mis à disposition les collections d'échantillons anciens de pin d'Alep. Ces travaux ont été financés par l'Agence Nationale de la Recherche (projet DROUGHT+, n° ANR-06-VULN-003-04), le ministère de l'Écologie et du Développement durable (AO GICC, projet REFORME, n° MEED D4E CV05000007), le Conseil général des Bouches-du-Rhône (CG13), la Fédération de recherche ECCOREV (FR3098) et le Cemagref.

Bibliographie

- Cannell M.G.R. ; Thompson S. ; Lines R. (1976) An analysis of inherent differences in shoot growth within some north temperate conifers. In: Tree physiology and yield improvement, (eds Cannell M.G.R. ; Last F.T.), Academic Press, London, New-York, p. 173-205.
- Chuine I. (2005a) Un réseau d'observations phénologiques pour la gestion du changement climatique In: "De l'observation des écosystèmes forestiers à l'information sur la forêt", Symposcience, Paris, 2-3 février 2005 p. 49-58. En ligne: <http://www.symposcience.org/exl-doc/colloque/ART-00002050.pdf>.
- Chuine I. (2005b) Vendanges et Climat. Les dates de vendanges nous révèlent le climat passé. *Naturellement*, n° 84, p. 26-27.
- Chuine I. ; Cour P. (1999) Climatic determinants of budburst seasonality in four temperate-zone tree species. *New Phytologist*, vol. 143, n° 2, p. 339-349.
- Cruziat P. ; Cochard H. ; Ameglio T. (2002) Hydraulic architecture of trees: main concepts and results. *Annals of Forest Science*, vol. 59, n° 7, p. 723-752.
- Daux V. ; Yiou P. ; Le Roy Ladurie E. ; Mestre O. ; Chevet J.-M. (2007) Température et dates de vendanges en France. In: Actes du colloque : Réchauffement climatique, quels impacts probables sur les vignobles ?, Dijon (2007), France.
- Devaux J.P. ; Le Bourhis M. (1978) La limite septentrionale du pin d'Alep en France. Etude dendroclimatique de l'impact des froids exceptionnels. *Biologie Ecologie méditerranéenne*, vol. V, n° 4 p. 133-158.
- Didier C. (2010) The impacts of repeated drought on the aboveground primary growth of *Pinus halepensis* Mill. and *Quercus ilex* L. in Mediterranean France. Master 2R, GR EMAX, Cemagref Aix en Provence, Université de Poitiers, Aix en Provence, 50 p.
- Differt J. (2001) Phénologie des espèces arborées. Synthèse bibliographique. Analyse des données du Réseau National de Suivi à long terme des Ecosystèmes Forestiers (RENECOFOR). ENGREF - INRA, Nancy.
- Falusi M. ; Calamassi R. (1996) Geographic variation and bud dormancy in beech seedlings (*Fagus sylvatica* L.). *Annales des Sciences Forestières*, vol. 53, n° 5, p. 967-979.
- Girard F. ; Vennetier M. ; Ouarmim S. ; Caraglio Y. ; Misson L. (2010) Polycyclism, a fundamental tree growth process, decline with recent climate change. The example of *Pinus halepensis* Mill. in Mediterranean France. *Trees - Structure and function*, vol. 25, n° 2, p. in press.
- Hesselbjerg-Christiansen J. ; Hewitson B. (2007) Regional Climate Projection. In: 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. chap 11, pp 847-940.
- Lanner R.M. (1976) Patterns of shoot development in Pinus and their relation to growth potential. In: Tree physiology and yield improvement, (eds Cannell M.G.R. ; Last F.T.), Academic Press, London, New-York, p. 223-243.
- Lebourgeois F. (2005) Augmentation de la productivité des forêts françaises : bilan actuel et conséquences prévisibles. *Forêt-Entreprise*, n° 162, p. 30-34.
- Lebourgeois F. ; Pierrat J.-C. ; Godfroy P. ; Ulrich E. ; Cecchini S. ; Lanier M. (2007) Relation entre les stades phénologiques et les variables climatiques. *RV techniques ONF*, n° Hors série 4, p. 127-132.
- Lebourgeois F. ; Pierrat J.C. ; Perez V. ; Piedallu C. ; S. C. ; Ulrich E. (2008) Déterminisme de la phénologie des forêts tempérées françaises : Etude sur les peuplements du RENECOFOR. *Revue Forestière Française*, vol. 60, n° 3, p. 323-343.
- Martinez N. (2002) Recherche du déterminisme géographique et écologique des attaques du champignon *Crumenulopsis sororia* (Karst.) Groves sur les rameaux de pinus halepensis Mill. en région PACA. Université Paul Cézanne, Cemagref Aix en Provence, 42 p.
- Morin X. ; Chuine I. (2007) Modification de la phénologie, des risques de gel et de la répartition des essences ligneuses nord-américaines suite au changement climatique. *Rendez-vous Techniques ONF*, vol. Hors série n°3, p. 15-20.
- Pardos M. ; Climent J. ; Gil L. ; Pardos J.A. (2003) Shoot growth components and flowering phenology in grafted *Pinus halepensis* Mill. *Trees-Structure and Function*, vol. 17, n° 5, p. 442-450.
- Rathgeber C. (2002) Impact des changements climatiques et de l'augmentation du taux de CO2 atmosphérique sur la productivité des écosystèmes forestiers : exemple du pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.) en Provence calcaire (France). PH.D, Université d'Aix - Marseille III, FRANCE, Marseille, 312 p.
- Rathgeber C.B.K. ; Misson L. ; Nicault A. ; Guiot J. (2005) Bioclimatic model of tree radial growth: application to the French Mediterranean Aleppo pine forests. *Trees-Structure and Function*, vol. 19, n° 2, p. 162-176.
- Ripert C. ; Vennetier M. ; Blanc L. ; Brochiéro F. ; Chandiooux O. ; Chapelle B. ; Estève R. ; Gadiri N. ; Hervé J.C. ; Manlay R. ; Nassif Y. ;

- Rathgeber C. (2001) Ecologie et croissance du pin d'Alep en France. Cemagref, Aix en Provence, 38 p.
- Serre F. (1976) Les rapports de la croissance et du climat chez le pin d'Alep (*Pinus halepensis* (Mill)) II L'allongement des pousses et des aiguilles, et le climat Discussion Générale. *Oecologia Plantarum*, vol. 11, n° 3, p. 201-224.
- Vennetier M. ; Borgniet L. ; Thabeet A. ; Gadbin-Henry C. ; Ripert C. ; Vila B. ; Prévosto B. ; Estève R. ; Martin W. ; N'diaye A. (2008) Impact de la canicule 2003 sur les peuplements résineux de la région PACA. Rapport final. Cemagref, Aix en Provence, 22 p.
- Vennetier M. ; Cecillon L. ; Guénon R. ; Schaffhauser A. ; Vergnoux A. ; Boichard J.-L. ; Bottéro J.-Y. ; Brun J.-J. ; Carrara M. ; Cassagne N. ; Chandioix O. ; Clays-Josserand A. ; Commeaux C. ; Curt T. ; Czarnes S. ; De Danieli S. ; Degrange V. ; Di Rocco R. ; Domeizel M. ; Doumenq P. ; Doussan C. ; Estève R. ; Faivre N. ; Favier G. ; Gaudu J.-C. ; Gros R. ; Guiliano M. ; Guillaumaud N. ; Hoepffner M. ; Juvy B. ; Le Roux X. ; Lebarillier S. ; Malleret L. ; Martin W. ; Mas C. ; Masion A. ; Massiani C. ; Mermin E. ; Mille G. ; Morge D. ; Pignot V. ; Poly F. ; Renard D. ; Ripert C. ; Ruy S. ; Tardif P. ; Tatoni T. ; Théraulaz F. ; Vassalo L. ; Asia L. (2010a) Repeated droughts and fires mutually increase their impact on forest ecosystems. In: XXIII IUFRO world congress, (eds Parrotta J.A. ; Carr M.A.), Commonwealth Forestry Association, Seoul, Korea, 23-28 August 2010, p. 57-58.
- Vennetier M. ; Girard F. ; Ouarmim S. ; Thabeet A. ; Ripert C. ; Cailleret M. ; Caraglio Y. (2010b) Climate change impact on tree architecture may contribute to forest decline and dieback. In: XXIII IUFRO world congress, (eds Parrotta J.A. ; Carr M.A.), Commonwealth Forestry Association, Seoul, Korea, 23-28 August 2010, p. 45.
- Vennetier M. ; Ripert C. (2010c) Flore méditerranéenne et changement climatique: la course-poursuite est engagée. *Forêt méditerranéenne*, vol. XXXI, n° 1, p. 15-24.
- Vennetier M. ; Ripert C. ; Brochiero F. ; Chandioix O. (1999) Evolution à court et long terme de la croissance du pin d'Alep en Provence. Conséquence sur la production de bois. *Forêt méditerranéenne*, vol. tome XX, n° 4, p. 147-156.
- Vennetier M. ; Vila B. ; Liang E.-Y. ; Guibal F. ; Ripert C. ; Chandioix O. (2006) Les changements climatiques modifient l'équilibre pin sylvestre / pin d'Alep. *Forêt Entreprise*, n° 169, p. 47-51.
- Vila B. ; Vennetier M. (2003) Impact du changement climatique sur le déplacement d'une limite bioclimatique en région méditerranéenne. Cemagref, IMEP, ECOFOR, Aix en Provence, 141 p.
- Vila B. ; Vennetier M. (2008) Les changements globaux ont-ils déjà induit des changements de croissance en forêt méditerranéenne ? Le cas du pin d'Alep et du pin sylvestre de la Sainte-Baume. *Forêt méditerranéenne*, vol. XXIX, n° 2, p. 161-166.

Résumé

La phénologie du pin d'Alep a été observée de façon continue de 2007 à 2010 sur un dispositif expérimental situé dans le domaine départemental de Fontblanche (Bouches-du-Rhône). Des mesures de croissance ont été effectuées annuellement le long d'un transect altitudinal allant de 80 m sur la côte (Saint-Mitre, Bouches-du-Rhône) jusqu'à 650 m (Siou-Blanc, Var). Le dispositif de Fontblanche comprend une zone d'exclusion permanente de 30% des précipitations, une zone irriguée au printemps et en automne et deux zones témoins, pour simuler les effets du changement climatique sur la pluviométrie. Le réchauffement climatique en cours se traduit par d'importantes modifications phénologiques, et notamment des variations du polycyclisme. De 2008 à 2010, le pin d'Alep à Fontblanche a montré une activité quasiment ininterrompue sur toute l'année : le premier cycle de croissance printanier a ainsi démarré dès les mois de novembre ou décembre de l'année précédente, au lieu de février-mars. En 2009 et 2010, l'apparition des boutons floraux mâles a été observée en décembre, soit avec 1 à 2 mois d'avance, phénomène qui n'avait jamais été mentionné. En raison d'automne chauds, des cycles de croissance très tardifs sont apparus en octobre ou début novembre, conduisant à des pousses inachevées, sans aiguilles ou portant des aiguilles très petites. La fréquence de ce phénomène semble avoir augmenté dans les 10 dernières années. Il a conduit à de nombreux avortements de pousses mal lignifiées suite à des dégâts de gel ou de champignons en hiver. L'exclusion de pluie a diminué le nombre annuel de cycles de croissance des pousses et la durée de ces cycles. Elle a aussi diminué la vitesse de croissance des aiguilles. L'irrigation a augmenté le nombre et la durée des cycles, qui ont été plus précoces. Elle a permis une croissance active et continue des aiguilles et d'une partie des pousses en été. L'analyse rétrospective sur 15 ans de nombreuses branches le long du transect a permis de quantifier l'évolution temporelle du polycyclisme. Elle montre que la phénologie est contrainte à la fois par la longueur et la précocité de la sécheresse d'été, et aux plus hautes altitudes par le froid qui limite la durée de la saison de végétation. Le changement climatique joue de façon opposée sur ces deux contraintes.

Mots clefs : phénologie, pin d'Alep, changement climatique, polycyclisme, croissance, floraison, aiguilles, exclusion de pluie, irrigation

Summary

Phenological adaptation of the Aleppo pine to climate change

The phenological phases of the Aleppo pine were observed weekly from 2007 until 2010 in experimental plots in the Fontblanche forest (*Bouches-du-Rhône*, S.-E. France) and along an altitudinal transect from 80 m on the coast up to 650 m. The Fontblanche experiment includes a permanent rain exclusion plot (-30 %), a plot irrigated in spring and autumn and two control plots, to simulate the effects of climate change on rainfall. The current ongoing climate warming has induced important phenological modifications. From 2008 until 2010, the Aleppo pine in Fontblanche showed almost continuous activity throughout the year: the first growth cycle of spring, usually in February-March, began in November or December of the previous year. In 2009 and 2010, the development of male floral buds was observed in December, 2 - 3 months too early, which had never been mentioned. Because of warm autumns, very late growth cycles appeared in October or the beginning of November, leading to unfinished shoots, carrying either no or only very small needles. The frequency of this phenomenon seems to have increased in the last 10 years. It has led to the abortion of numerous shoots which were insufficiently lignified following damage by frost or fungus in winter. The rain exclusion reduced the annual number of shoot growth cycles as well as the duration of these cycles. It also slowed down the lengthening of needles. Irrigation increased the number and the length of cycles which also started earlier. It enabled the active, continuous growth of needles and of part of the shoots in summer. A 15-year retrospective branch analysis along the transect made it possible to quantify the evolution of polycyclism. It showed that phenology is forced by the length and the earliness of the summer drought and, at the highest altitude, by cold which limits the duration of the growth season. Climate change results in the opposite effect in modifying these two constraints.

key words: Phenology; *Pinus halepensis*; climate change; polycyclism; growth; flowering; needles; rain exclusion; irrigation

Riassunto

Adattamento fenologico del pino d'Aleppo al cambiamento climatico

La fenologia del pino d'Aleppo è stata osservata in modo continuo dal 2007 al 2010 su un dispositivo sperimentale situato nel demanio dipartimentale di Fontblanche (Bocche de Rodano). Misure di crescita sono state effettuate annualmente lungo un transetto altitudinale andando di 80 m sulla costa (Saint-Mitre, Bocche del Rodano) fino a 650 m (Siou-Blanc, Var). Il dispositivo di Fontblanche racchiude una zona di esclusione permanente di 30 % dei precipitazioni, una zona irrigata alla primavera e in autunno e due zone campioni, per simulare gli effetti del cambiamento sulla pluviometria. Il riscaldamento climatico in corso si traduce da importanti modifiche fenologiche, e in particolare variazioni del policiclismo. Dal 2008 al 2010, il pino d'Aleppo di Fontblanche ha mostrato un'attività quasi ininterrotta tutto l'anno: il primo ciclo di crescita primaverile è così incominciato fino i mesi di novembre o dicembre dell'anno precedente, invece di febbraio-marzo, sia con 1 a 2 mesi d'anticipo. Nel 2009 e 2010, la comparsa dei boccioli maschi è stata osservata in dicembre, sia con 1 a 2 mesi d'anticipo, fenomeno che non è stato mai menzionato. In ragione di autunni caldi, cicli di crescita molto tardivi sono apparsi in ottobre o inizio di novembre, conducendo a germogli incompiuti, senza aghi o portando aghi piccolissimi. La frequenza di questo fenomeno sembra di avere aumentato nei 10 ultimi anni. Ha condotto a numerosi aborti di germogli male legnificati in seguito a danni di gelo o di funghi in inverno. L'esclusione di pioggia ha ridotto il numero annuale dei cicli di crescita dei germogli e la durata dei cicli. Ha anche ridotto la velocità di crescita degli aghi. L'irrigazione ha aumentato il numero e la durata dei cicli, che sono stati più precoci. Ha permesso una crescita attiva e continua degli aghi e di una parte dei germogli in estate. L'analisi retrospettiva su 15 anni di numerose branche lungo il transetto ha permesso di quantificare l'evoluzione temporale del policiclismo. Mostra che la fenologia è costrinta contemporaneamente dalla lunghezza e dalla precocità della siccità estiva, e alle altitudini più alte dal freddo che limita la durata della stagione di vegetazione. Il cambiamento climatico gioca in modo opposto su queste due costrizioni.

Parole chiavi : fenologia, pino d'Aleppo, cambiamento climatico, policiclismo, fioritura, aghi, esclusione di pioggia, irrigazione.

Les réponses des arbres aux contraintes climatiques : aspects écophysiologicals

par Roland HUC

Face à l'allongement de la saison sèche estivale liée au changement climatique, quels mécanismes physiologiques sont mis en place par les arbres pour résister à la sécheresse ?

L'auteur nous présente les deux stratégies utilisées par les plantes : l'évitement des déficits hydriques et la tolérance à la déshydratation sur le long terme.

Un seuil de vulnérabilité fait apparaître des relations entre espèces, habitat et région bioclimatique, une information particulièrement utile dans un objectif de sélection de provenances.

Introduction

Les changements climatiques déjà en œuvre ou attendus pour les prochaines décennies concernent l'augmentation de gaz carbonique. Ils se rapportent également à une augmentation de la température de l'air et à une réduction des précipitations conduisant, notamment en région méditerranéenne, à une saison sèche estivale plus longue. La vague de chaleur et la sécheresse exceptionnelle qui ont concerné l'Europe en 2003 se sont traduites par une réduction, sans précédent au siècle dernier, de la productivité primaire des écosystèmes (CIAIS, 2005). Ces changements climatiques dont les effets sont visibles à partir des observatoires que constituent les SOERE (Systèmes d'observation et d'expérimentation au long terme pour la recherche en environnement) affectent à des degrés divers le fonctionnement des arbres (BRÉDA *et al.*, 2004) et sont perceptibles par différentes réponses écophysiologicals.

Les conséquences de l'augmentation de gaz carbonique (CO₂) sur la photosynthèse foliaire peuvent, dans une certaine mesure, s'avérer bénéfiques sur la croissance ; ceci, par un effet, bien connu en horticulture, lié à l'augmentation de la matière première que représente le CO₂. L'augmentation de la température de l'air a, par contre, pour conséquence d'augmenter l'évapotranspiration potentielle des couverts végétaux. En d'autres termes, la demande d'eau par l'atmosphère aux plantes est accrue. Simultanément, l'allongement de la saison sèche, qui entraîne une consommation de l'eau du sol sur de plus longues

périodes, accélère la dynamique d'épuisement de la réserve en eau des sols. Dotés d'un enracinement souvent profond et, par conséquent, d'une plus forte capacité de mobilisation de l'eau du sol par rapport à la plupart des herbacées, les espèces arborées améliorent ainsi leur capacité à résister à la sécheresse. L'épuisement de la réserve en eau du sol mobilisable par les plantes, également appelée réserve utile, n'est cependant que différée. La baisse progressive de cette réserve hydrique provoque des réponses appropriées au niveau de la plante.

Fermeture stomatique en réponse à la baisse du réservoir en eau du sol

Lorsque l'eau du sol descend en dessous du seuil de 40% de la valeur maximale de la réserve utile, les arbres répondent par la fermeture des pores (stomates) situés au niveau de leurs feuilles ou de leurs aiguilles (GRANIER *et al.* 1995). La réponse stomatique protège ainsi l'arbre contre les pertes en eau et limite l'épuisement de l'eau du sol. Cette réponse stomatique est réversible. Plusieurs autres facteurs peuvent déclencher un signal entraînant une réponse des stomates. C'est le cas de la lumière, de l'humidité de l'air (FARQUHAR & SHARKEY, 1982) ou encore de composés xylémiens comme l'acide abcis-

sique (ABA) (TARDIEU *et al.* 1992). En contrepartie, la régulation des pertes d'eau par la fermeture stomatique s'accompagne d'une réduction de l'entrée du CO₂ provoquant ainsi une réduction de la photosynthèse.

Il y a donc un effet antagoniste du changement climatique sur l'assimilation du CO₂ par les plantes. L'effet « fertilisant » associé à l'augmentation du CO₂ pouvant être contrecarré par une baisse de la photosynthèse lié à la fermeture des stomates.

Effizienz d'utilisation de l'eau et adaptation

Le rapport entre la capacité photosynthétique ou assimilation (A), qui traduit le flux de CO₂ entrant, et le flux de vapeur d'eau sortant (contraint par la conductance stomatique g_s , Cf. Fig. 1) exprime l'efficacité d'utilisation de l'eau instantané $WUE_i (A/g_s)$. WUE_i représente une valeur de biomasse produite par quantité d'eau consommée. Une expression de cette valeur, intégrée sur un plus long terme, est fournie par la mesure de la discrimination des isotopes naturels du carbone au cours de la photosynthèse ($\delta^{13}C$). WUE_i varie entre les espèces et, à l'intérieur d'une même espèce, entre les provenances et présente une héritabilité (BRENDDEL *et al.*, 2002). Il n'existe toutefois pas de relations claires entre l'efficacité d'utilisation de l'eau et la tolérance à la sécheresse (ZHANG *et al.* 1997). Par ailleurs, les géotypes les plus productifs présentent souvent un faible niveau de tolérance à la sécheresse soit une forte réduction de biomasse sous contrainte hydrique (MONCLUS *et al.* 2006, DUCREY *et al.* 2008).

Survie et tolérance à la sécheresse

Très peu de travaux en écophysiologie des arbres sont liés à la mesure directe des relations entre survie et tolérance à la sécheresse. La capacité de tolérance à la sécheresse, ou encore tolérance à la dessiccation, requiert des capacités physiologiques particulières. Ces capacités permettent de maintenir le transport de la sève, les échanges gazeux ou la survie des cellules à des valeurs

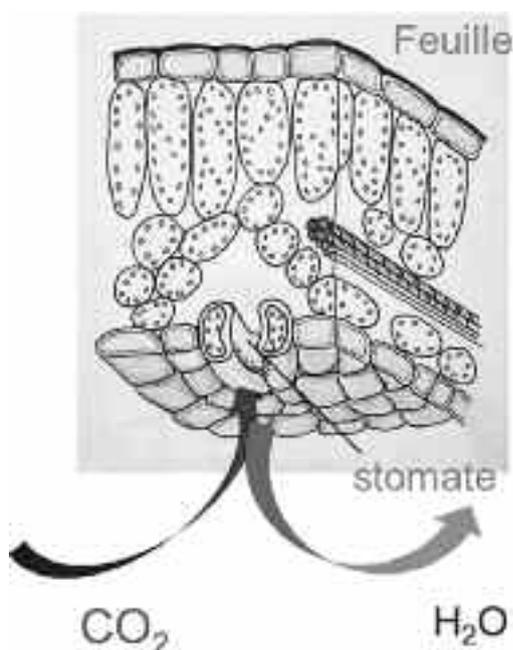


Fig. 1 :
Vue perspective d'une coupe de feuille et d'un stomate contrôlant les flux de CO₂ et de vapeur d'eau.

de faible teneur en eau ou de potentiel hydrique fortement négatifs (TYREE *et al.* 2003). Parmi ces différentes aptitudes, nous nous proposons d'examiner plus particulièrement la capacité à maintenir le transport de la sève brute.

Tolérance à la sécheresse et transport de la sève brute

Dans les arbres, l'ascension de la sève brute se fait suivant la théorie de la tension-cohésion. Cette sève se compose de colonnes d'eau continues tirées par la tension provoquée par la transpiration au niveau des feuilles (Cf. Fig. 2).

La demande accrue de transpiration non compensée par une absorption racinaire suffisante accroît considérablement les tensions dans le xylème. Cela se traduit par la rupture de la cohésion des molécules d'eau, plus simplement par de l'embolie gazeuse, conduisant à terme à une perte de conductivité des différents organes concernés. Cette perte de conductivité exprimée en pourcentage par rapport à la conductivité maximale s'accroît avec la sécheresse, mesurée par des tensions de plus en plus négatives du xylème (Cf. Fig. 3). La valeur P₅₀, correspondant à la tension dans la sève provoquant une perte de 50% de conductivité de l'organe considéré, est universellement acceptée comme critère permettant de comparer les espèces. L'évolution simultanée de la conductance stomatique (g_s) et de la conductivité hydraulique au cours de

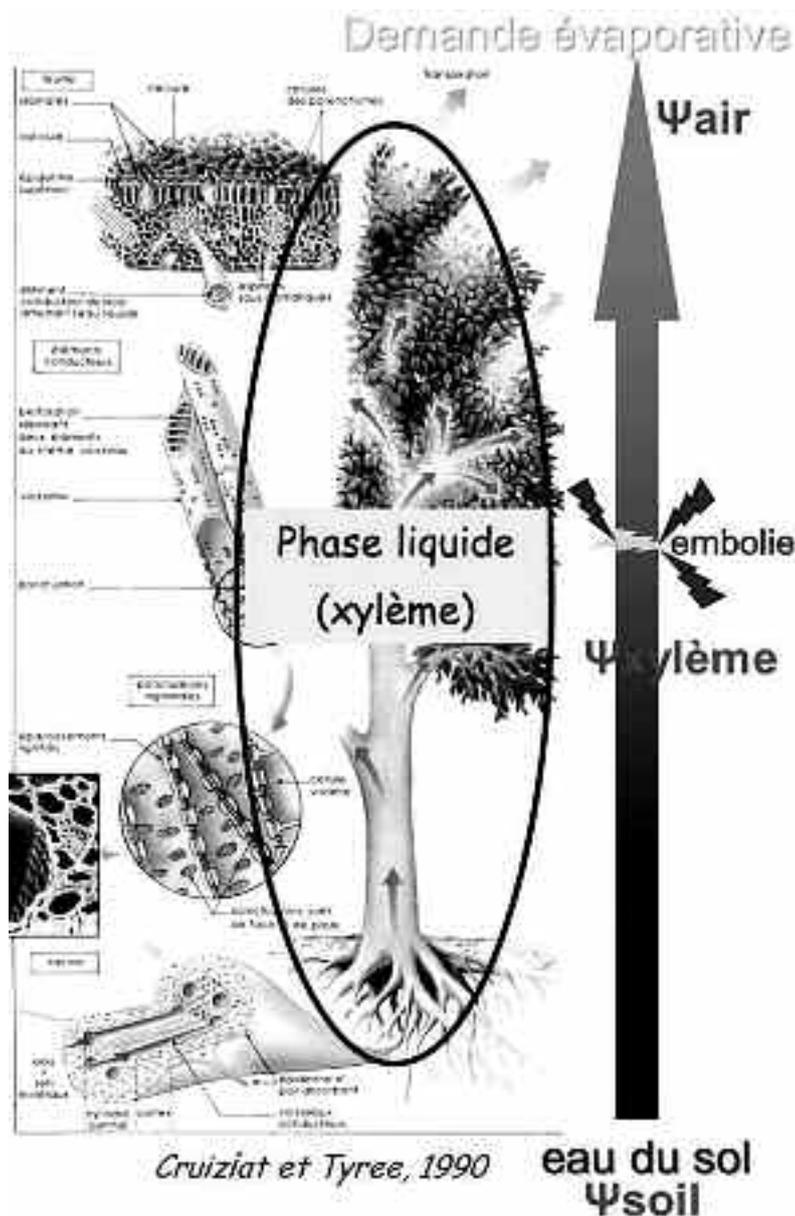
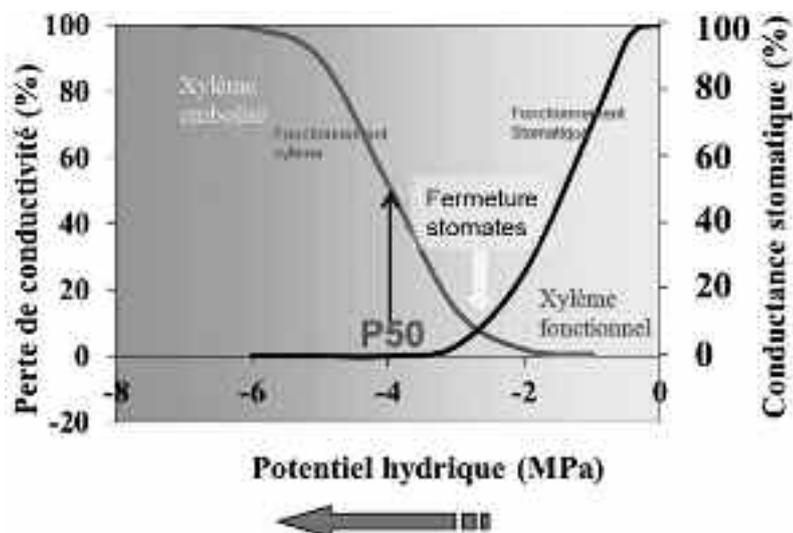


Fig. 2 (en haut) :
Schéma de l'ascension de la sève depuis l'eau du sol jusqu'aux sites d'évaporation d'après Cruziat et Tyree (1990). Sous l'effet combiné de la forte demande évaporatoire de l'air et du faible apport d'eau par le sol, le xylème atteint des valeurs de potentiel hydrique (ψ xylème) très fortement négatives provoquant la rupture des colonnes d'eau par embolie gazeuse.

Fig. 3 (ci-contre) :
Courbe grise : Evolution de la perte de conductivité (en % de la valeur maximale) en fonction de la sécheresse dans une branche, représentée par les potentiels hydriques ou tensions de plus en plus négatives (MPa) ; flèche grise : La valeur de P₅₀ correspond au potentiel induisant 50% de perte de conductivité. Courbe noire : Evolution de la fermeture stomatique (en % de la valeur de conductance maximale)



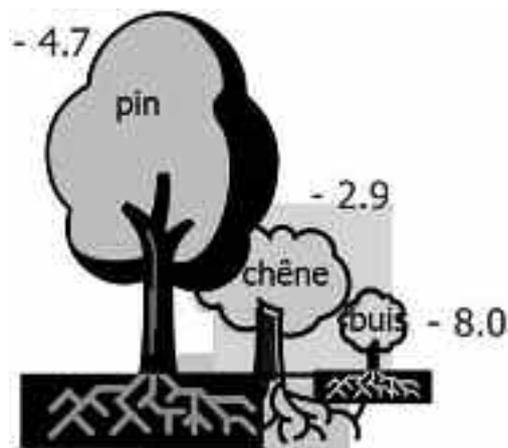


Fig. 4 :
Variabilité du caractère P₅₀ dans un écosystème forestier mélangé comprenant du pin d'Alep, du chêne vert et du buis. Valeurs relevées sur le site de Lamanon, Bouches-du-Rhône.

la sécheresse montre une réduction progressive de g_s pour atteindre une fermeture quasi complète au moment où se déclenche l'embolie (Cf. Fig. 3). Ce mécanisme, mis en évidence sur différentes espèces dont plusieurs espèces méditerranéennes telles que le pin d'Alep, le pin noir ou le cyprès vert (FROUX *et al.* 2005), suggère qu'il pourrait s'agir d'un dispositif de protection du xylème. Le trait P₅₀ caractérisant la vulnérabilité à la cavitation, est illustré (Cf. Fig. 4) en forêt mélangée de pin d'Alep, chêne vert et buis de Lamanon (Bouches-du-Rhône). Les espèces étudiées se distinguent nettement pour ce caractère. Il y a des raisons de penser qu'il existe une adaptation phénotypique entre la vulnérabilité et la niche du sol occupée par l'espèce et qui pourrait correspondre à des niveaux d'enracinement dans des compartiments de sol différents. L'horizon superficiel

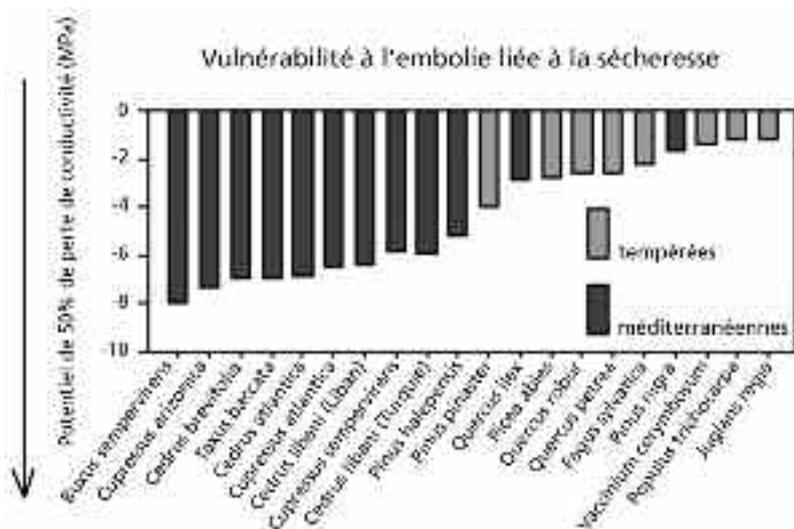
du sol est, en effet, le compartiment régulièrement confronté à un assèchement poussé. C'est également dans ce compartiment que l'on trouve les racines du buis, espèce présentant le P₅₀ le plus négatif.

Les espèces ligneuses méditerranéennes par rapport à d'autres ligneux tempérés (Cf. Fig. 5) présentent généralement une meilleure résistance à la vulnérabilité caractérisée par des P₅₀ plus négatifs (BRÉDA *et al.* 2006). Une méta-analyse pratiquée sur des espèces appartenant à plusieurs types biologiques et à différents bioclimats montre une relation entre l'augmentation de la résistance du xylème et la diminution des précipitations moyennes annuelles (MAHERALI *et al.* 2004).

Les stratégies d'évitement

Les réponses d'évitement de la sécheresse peuvent être « élastiques » et s'exercer sur le court terme, comme le mécanisme stomatique. Sur le moyen ou long terme, elles peuvent se traduire par une réaction "plastique" à l'échelle de la plante entière : c'est le cas de la modification de l'allocation de la biomasse issue de la photosynthèse. C'est ce que l'on observe par exemple sur des provenances de *Cedrus libani* et *Cedrus brevifolia* où, sous l'effet du stress hydrique édaphique, l'allocation du carbone va préférentiellement aux racines par rapport aux tiges (Cf. Fig. 6). Ces réponses vont dans le sens d'une augmentation de l'absorption de l'eau grâce au développement accru du système racinaire d'une part et d'une diminution de la biomasse aérienne susceptible d'intensifier les pertes d'eau d'autre part. Ce phénomène est illustré par la réduction de la surface foliaire, mesurée par l'indice foliaire (LAI) des arbres en peuplement, lors d'épisodes de sécheresse. Cette réduction peut se traduire par des défoliations complètes pour les sécheresses exceptionnelles (BRÉDA *et al.* 2006). Ces comportements suggèrent une hypothèse fonctionnelle : les plantes, en favorisant l'absorption et en limitant les pertes d'eau, éviteraient l'apparition des tensions fortement négatives dans le xylème susceptibles de provoquer des dysfonctionnements dans la conduction hydraulique. C'est l'hypothèse de conservation de l'homéostasie d'utilisation de l'eau, qui semble se vérifier sur beaucoup de conifères. Cette hypothèse homéostatique

Fig. 5 :
Comparaison de la valeur de P₅₀ chez différentes espèces, d'après Bréda *et al.* 2006.



est utilisée dans le cadre de certains modèles (MAGNANI *et al.* 2002).

Approche multi traits de la réponse à la sécheresse

De nombreux traits peuvent être pris en compte pour caractériser la résistance à la sécheresse en écophysologie. Une démarche d'analyse de ces différents traits qui se rapportent à la croissance, au fonctionnement stomatique, à la tolérance de l'appareil photosynthétique aux fortes températures (thermo-tolérance), au potentiel hydrique moyen pendant la sécheresse ou à la cavitation peut être menée simultanément. Les résultats obtenus, par exemple pour quatre groupes de cèdres méditerranéens, rassemblés par origine géographique, montrent une certaine cohérence dans le classement entre traits fonctionnels, suivant leur comportement vis-à-vis de la sécheresse du sol (Cf. Fig. 7). Ainsi, le cèdre de l'Atlas, qui possède la meilleure croissance annuelle, présente, pour la population observée, la moins bonne résistance à la sécheresse et la plus forte vulnérabilité. Ces différentes approches sont concordantes mais, pour la plupart complexes à mettre en œuvre dans une perspective de sélection ou pour évaluer l'adaptation des populations *in situ* face au changement climatique. Le recours à des traits applicables à large échelle est nécessaire. C'est déjà le cas pour déterminer les potentialités de croissance ($\delta^{13}C$). Par contre, l'utilisation du trait P_{50} , associé à la tolérance à la sécheresse, reste encore à développer.

Conclusion

Il y a un véritable enjeu à maintenir des conditions assurant l'homéostasie pour l'eau dans la gestion des peuplements. Les aménagements pratiqués (éclaircie, mélange d'espèces...) peuvent ainsi contribuer à une optimisation de la ressource hydrique disponible.

Les espèces les mieux adaptées existent, en vue d'une introduction raisonnée, ou peuvent être identifiées (arboretums, régions naturelles d'origine). Cependant, les taux de survie ou les croissances observées dans ces dispositifs, sont le résultat de facteurs multi-

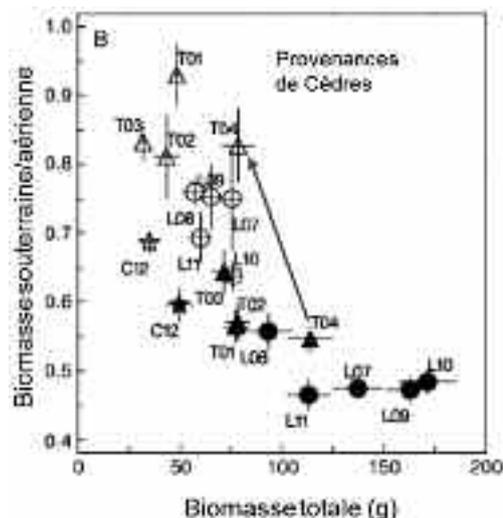


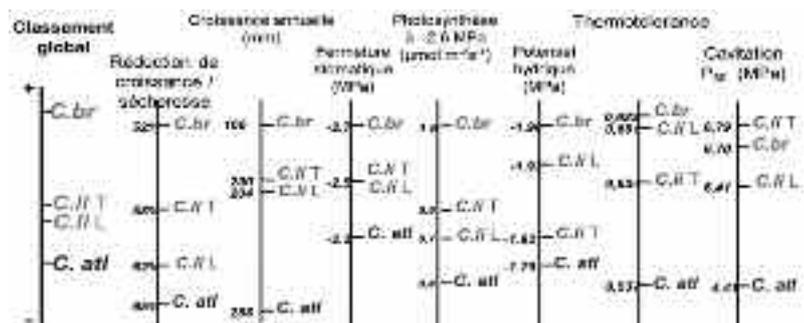
Fig. 6 : Evolution de la répartition de la biomasse entre parties aérienne et souterraine sous l'effet de la sécheresse illustrée à partir de différentes provenances de *Cedrus libani* originaires du Liban (L) et de Turquie (T), et sur le cèdre de Chypre (C), d'après Ducrey *et al.* 2008. Les plants ont été élevés en conditions d'alimentation en eau optimale (symboles pleins) et en conditions de sécheresse modérée (symboles ouverts).

ples (attaques d'insectes, dégâts de gel, sécheresse...) qui rendent souvent délicat l'interprétation en termes de tolérance. Les contraintes subies par les populations transplantées conduisent ainsi à une sélection dont il est nécessaire d'identifier précisément la cause.

Sur chacun des ensembles de traits (phénologiques, architecturaux, physiologiques) un champ d'investigation très fécond existe nécessitant une collaboration étroite entre l'écophysologie et la génétique, en relation avec la question de l'adaptation. Ainsi, la mise en évidence d'une potentielle adaptation locale en réponse au changement climatique implique non seulement l'identification des traits pertinents, mais aussi la prise en compte de l'héritabilité de ces traits et l'évaluation de leur valeur sélective.

Fig. 7 (ci-dessous) Classement de quatre provenances géographiques de Cèdres : *Cedrus atlantica* originaire du S-E de la France (*C. atl*), *C. libani* du Liban (*C. lib L*), *C. libani* de Turquie (*C. lib T*) et *C. brevifolia* de Chypre (*C. br*). Valeurs de croissance annuelle de semis, de sensibilité de la croissance par rapport à la sécheresse édaphique, de potentiel à fermeture stomatique, de photosynthèse, de potentiel hydrique à pleine turgescence, de thermotolérance et de cavitation (P_{50}). Un classement empirique global est obtenu à partir de l'ensemble des classements relatifs, d'après Ladjal 2001.

R.H.



Roland HUC
INRA URFM - Ecologie
des forêts méditerranéennes, UR 629
Site Agroparc
Domaine Saint Paul
84914 Avignon
Cedex 9
Mél : roland.huc@
avignon.inra.fr

Bibliographie

- Bréda, N.; Granier, A. & Aussenac, G. La sécheresse de 2003 dans le contexte climatique des 54 dernières années : analyse écophysologique et influence sur les arbres forestiers *Revue Forestière Française*, 2004, 56, 109-131.
- Bréda, N.; Huc, R.; Granier, A. & Dreyer, E. Temperate forest trees and stands under severe drought: a review of ecophysiological responses, adaptation processes and long-term consequences *Annals of Forest Science*, 2006, 63, 625-644
- Brendel, O.; Pot, D.; Plomion, C.; Rozenberg, P. & Guehl, J.-M. Genetic parameters and QTL analysis of $\delta^{13}C$ and ring width in maritime pine *Plant, Cell & Environment*, Blackwell Science Ltd, 2002, 25, 945-953
- Ciais, P.; Reichstein, M.; Viovy, N.; Granier, A.; Ogee, J.; Allard, V.; Aubinet, M.; Buchmann, N.; Bernhofer, C.; Carrara, A.; Chevallier, F.; De Noblet, N.; Friend, A. D.; Friedlingstein, P.; Grunwald, T.; Heinesch, B.; Keronen, P.; Knohl, A.; Krinner, G.; Loustau, D.; Manca, G.; Matteucci, G.; Miglietta, F.; Ourcival, J. M.; Papale, D.; Pilegaard, K.; Rambal, S.; Seufert, G.; Soussana, J. F.; Sanz, M. J.; Schulze, E. D.; Vesala, T. & Valentini, R. Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003 *Nature*, 2005, 437, 529-533
- Cruiziat, P. & Tyree, M. T. La montée de la sève dans les arbres. *La Recherche* (Paris), 1990, 21, 406-414
- Ducrey, M.; Huc, R.; Ladjal, M. & Guehl, J.-M. Variability in growth, carbon isotope composition, leaf gas exchange and hydraulic traits in the eastern Mediterranean cedars *Cedrus libani* and *C. brevifolia*. *Tree Physiology*, 2008, 28, 689-701.
- Farquhar, G. & Sharkey, T. Stomatal conductance and photosynthesis *Annual review of Plant Physiology and plant molecular biology*, 1982, 33, 317-345
- Froux, F.; Ducrey, M.; Dreyer, E. & Huc, R. Vulnerability to embolism differs in roots and shoots and among three Mediterranean conifers: consequences for stomatal regulation of water loss? *Trees*, 2005, 19, 137-144
- Granier, A.; Badeau, V. and Bréda, N. Modélisation du bilan hydrique des peuplements forestiers. *Revue Forestière Française*, 1995, 48, 59-68.
- Ladjal M. 2001 - Variabilité de l'adaptation à la sécheresse des cèdres méditerranéens (*Cedrus atlantica*, *C. brevifolia* et *C. libani*) ; aspects écophysologiques. Thèse de Doctorat de l'Université Nancy I, 212 p.
- Magnani, F.; Grace, J. & Borghetti, M. Adjustment of tree structure in response to the environment under hydraulic constraints *Functional Ecology*, 2002, 16, 385-393
- Maherali, H.; Pockman, W. T. & Jackson, R. B. Adaptive variation in the vulnerability of woody plants to xylem cavitation *Ecology*, 2004, 85, 2184-2199.
- Monclus, R.; Dreyer, E.; Villar, M.; Delmotte, F. M.; Delay, D.; Petit, J. M.; Barbaroux, C.; Thiec, D.; Brechet, C. & Brignolas, F. Impact of drought on productivity and water use efficiency in 29 genotypes of *Populus deltoides* x *Populus nigra*. *New Phytologist*, 2006, 169, 765-777
- Tardieu, F.; Zhang, J.; Katerji, N.; Bethenod, O.; Palmer, S. & Davies, W. J. Xylem ABA Controls the Stomatal Conductance of Field-Grown Maize Subjected to Soil Compaction or Soil Drying *Plant Cell and Environment*, 1992, 15, 193-197.
- Tyree, M. T.; Engelbrecht, B. M. J.; Vargas, G. & Kursar, T. A. Desiccation tolerance of five tropical seedlings in Panama. Relationship to a field assessment of drought performance *Plant Physiology*, 2003, 132, 1439-1447
- Zhang, J. W.; Feng, Z.; Clegg, B. M. & Schumann, C. M. Carbon isotopic composition, gas exchange, and growth of three populations of ponderosa pine differing in drought tolerance *Tree Physiology*, 1997, 17, 461-466.

Résumé

L'allongement de la saison sèche estivale pouvant être associé au changement climatique pose de façon cruciale la question de la résistance des espèces à la sécheresse.

Pour faire face à la baisse prolongée de l'alimentation hydrique, les arbres ont développé plusieurs mécanismes de résistance que l'on peut grouper en deux grandes catégories (Ludlow, 1989) :

– une stratégie d'évitement des déficits hydriques par des réponses élastiques (ouverture-fermeture des stomates, mouvements foliaires) et des réponses plastiques (modulation des surfaces absorbantes et transpirantes) ;

– une stratégie de tolérance permettant de supporter la déshydratation sur le long terme.

Ces différents mécanismes peuvent se coordonner autour d'un objectif pour la plante : maintenir l'acheminement de la sève brute entre le sol et l'atmosphère. Pour cela, il faut limiter l'embolie du système conducteur provoquée par les tensions associées à la sécheresse. L'évolution de la perte de conductivité hydraulique, par embolie, en fonction de la sécheresse, permet de déterminer un seuil de vulnérabilité. Ce seuil fait apparaître des relations entre espèces et habitat et entre espèces et région bioclimatique, particulièrement utiles dans un objectif de sélection de provenances. Deux questions sont posées : la première concerne l'héritabilité de ce trait et la seconde concerne son rôle potentiel dans une adaptation locale des espèces à une sécheresse accrue.

Les changements climatiques et leurs effets sur les forêts méditerranéennes : aspects génétiques

par Bruno FADY

Que peuvent faire les arbres forestiers et leurs écosystèmes en réponse aux changements climatiques qui s'installent sur la longue durée ?

Comme tous les organismes vivants, ils peuvent mettre en place trois grandes stratégies : s'acclimater, s'adapter et/ou fuir.

Dans cet article, l'auteur nous décrit les différents mécanismes d'adaptation génétique et propose de réfléchir à des pratiques sylvicoles permettant une gestion adaptative de la forêt méditerranéenne.

Changement climatique et adaptation

Il est maintenant bien établi que la terre traverse une intense période de changements climatiques et il est aussi bien établi que l'homme et ses activités industrielles et domestiques en sont la cause principale (IPCC 2007). Commencé il y a 140 ans avec la révolution industrielle, ce changement climatique global se caractérise par un accroissement des températures moyennes annuelles. Les régimes des pluies ont, eux aussi, significativement changé dans la plupart des régions du monde. Ainsi, les précipitations sont en forte augmentation en Europe du Nord alors qu'elles ont fortement diminué en Asie du Sud. Les prévisions pour la fin du XXI^e siècle varient en fonction des scénarios socio-économiques, mais toutes indiquent une continuation de l'augmentation des températures au niveau mondial, qui est aujourd'hui de 0,4°C comparé à la moyenne 1961-1990. Dans la gamme des scénarios décrits par les experts internationaux du climat, les tendances actuelles sont plutôt pessimistes en termes de modification par rapport à la normale que constituent les années de référence 1961-1990 (IPCC 2007). En région méditerranéenne, cette augmentation de la température ira de pair avec une diminution de la pluviométrie estivale (IPCC 2007). Un scénario médian comme le scénario A1B prévoit une augmentation de la sécheresse estivale (+3 à 5°C ; -0,1 à -0,4 mm/jour de juin à août) pour la période 2080-2099 (IPCC 2007) par rapport à l'actuel.

Pour les forêts méditerranéennes, une telle situation se traduira par une plus faible disponibilité en eau pendant la saison de croissance, avec pour conséquence des modifications significatives de la distribution géographique des espèces et des communautés, les aires de répartition des espèces n'étant plus en adéquation avec leurs niches écologiques.

Que peuvent faire les arbres pour faire face aux changements climatiques ? Comme pour tous les êtres vivants, trois grandes stratégies s'offrent à eux :

- l'acclimatation (plasticité) : les arbres peuvent survivre et continuer à pousser et se reproduire parce qu'ils ont des exigences écologiques flexibles ;

- la "fuite" par la migration (les graines se dispersent au loin et germent dans des conditions plus favorables ou le pollen s'hybride avec une espèce ou un écotype plus résistant) ;

- l'adaptation au sens génétique du terme (la génération suivante possède des caractères différents, plus efficaces, après sélection naturelle). C'est ce qui fait l'objet de cet article.

L'adaptation (au sens génétique du terme) ne peut se faire que si les individus d'une même espèce sont génétiquement variables, si le patrimoine génétique de chacun d'entre eux est différent de celui des autres. Par le biais de la reproduction sexuée et de la sélection naturelle s'exerçant sur les descendants qui en sont issus, la génération suivante

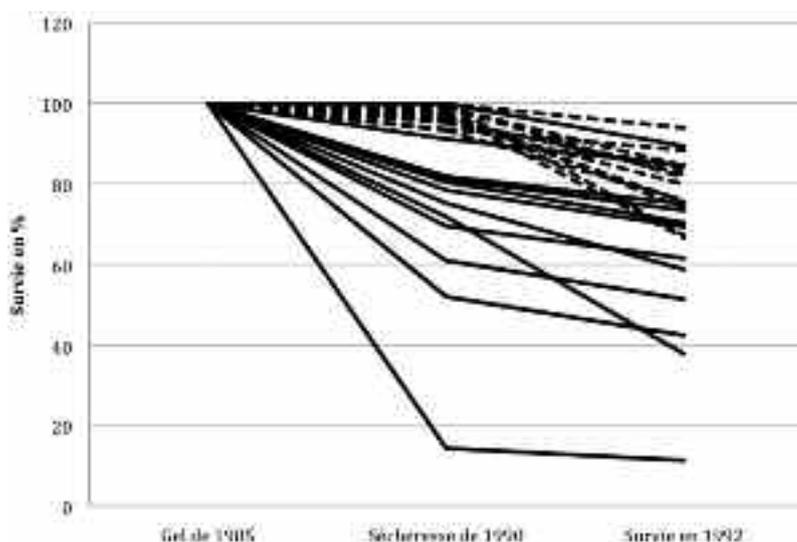
aura un patrimoine génétique (un génotype) différent de celui de ses géniteurs, s'exprimant sous la forme de phénotypes (l'expression d'un génotype donné dans un environnement particulier) potentiellement mieux adapté aux nouvelles conditions de milieu issues du changement climatique. Les arbres forestiers sont caractérisés par une très grande variabilité génétique, du fait de leur histoire évolutive et de leur longévité (AUSTERLITZ *et al.* 2000). A de rares exceptions près comme le pin pignon (VENDRAMIN *et al.* 2008), les arbres forestiers méditerranéens sont eux aussi génétiquement variables. L'existence de cette variabilité permet de formuler deux hypothèses non mutuellement exclusives pour permettre à la forêt méditerranéenne de s'adapter (au sens génétique du terme) au changement climatique.

Adaptation et variabilité génétique entre populations : la migration assistée

Les travaux classiques de génétique forestière nous enseignent que les espèces ne sont pas des entités homogènes. Bien au contraire, elles sont constituées de populations qui peuvent être très différentes les unes des autres pour de nombreux caractères adaptatifs. Le pin d'Alep (*Pinus halepensis*) et le pin de Brutie (*Pinus brutia*), deux pins typiques des étages thermo- et méso-méditerranéens, illustrent bien cette variabilité génétique, elle-même variable d'une espèce à l'autre. La variabilité génétique est classiquement mesurée dans des dispositifs appelés plantations comparatives en jardin commun, dans lesquels sont comparés les caractéristiques adaptatives d'individus d'origines diverses. S'exprimant dans un environnement commun, les différences adaptatives observées entre les différents phénotypes sont le reflet direct des différences entre génotypes. Dans la figure 1, diverses origines géographiques (appelées provenances) de pin d'Alep et de pin de Brutie sont comparées en termes de survie chaque année dans une même plantation comparative. Si la survie du pin de Brutie est globalement meilleure que celle du pin d'Alep en 1996, la variabilité du pin d'Alep pour ce caractère est plus grande que celle du pin de Brutie et certaines provenances de

Fig. 1 :

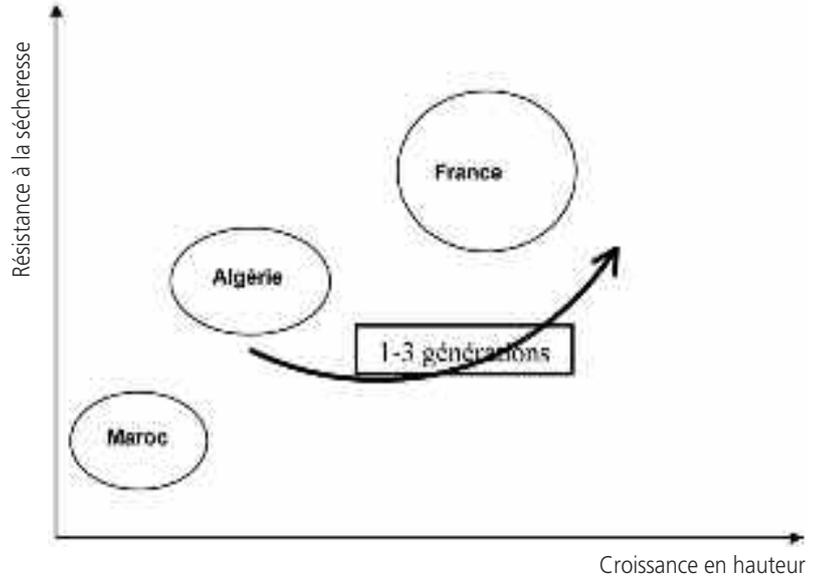
Survie en plantation comparative de provenances de *Pinus halepensis* (en trait plein) et *Pinus brutia* (en trait pointillé) après deux événements climatiques majeurs (gel de 1985 et sécheresse de 1990). D'après Bariteau (1992).



pin d'Alep ont une meilleure survie que celles du pin de Brutie. Par ailleurs, on note un comportement globalement différent entre les deux espèces. Alors que les provenances de pin d'Alep semblent sensibles aux gels hivernaux, les provenances de pin de Brutie le sont plus manifestement aux années de forte sécheresse estivale. Cependant, là encore, il convient de noter la grande variabilité de comportements entre provenances d'une même espèce, certaines ayant une survie plus proche de celle de l'autre espèce que de celle des provenances de sa propre espèce.

Si nous avons la preuve que la variabilité génétique entre provenances est importante, nous avons aussi la preuve qu'elle peut évoluer rapidement sous l'effet de conditions écologiques qui changent, voire de crises écologiques. C'est ce qui s'est par exemple passé lors de l'introduction du cèdre de l'Atlas dans le sud de la France à la fin du XIX^e siècle. Issus de récoltes de graines en Algérie, des cèdres de l'Atlas (*Cedrus atlantica*) ont été installés dans les montagnes du sud de la France dès la deuxième moitié du XIX^e siècle et tout au long du début du XX^e siècle. Si l'on compare les performances de croissance et de survie des descendants de ces cèdres « français » par rapport à leurs parents issus de l'aire d'origine, une évolution marquée a eu lieu. La figure 2 montre que les cèdres français, moins de trois générations après leur introduction, dépassent largement leurs congénères (semblables à leurs parents) d'Afrique du Nord en termes de croissance et résistance à la sécheresse (Cf. Fig. 2).

L'adaptation rapide, lorsque l'environnement change, même de façon importante, est donc possible chez les arbres forestiers. Mais comment en tirer parti dans le cas particulier du réchauffement climatique global ? Malgré une forte diversité génétique avérée chez les arbres forestiers, la paléo-écologie nous indique que l'adaptation a des limites importantes en cas de changements climatiques majeurs. Plusieurs genres se sont



éteints en Europe aux cours des changements climatiques du Quaternaire (cycles glaciaires) : *Taxodium*, *Sequoia*, *Cedrus* ... et ce, notamment parce que la Méditerranée est une barrière infranchissable, empêchant la mise en place de refuges plus au sud que ses rivages septentrionaux. Les dépérissements du sapin pectiné (*Abies alba*) au sud de son aire de répartition depuis la canicule de 2003 pourraient préfigurer une extinction locale (Cf. Photo 1).

Par ailleurs, espérer que des transferts de gènes adaptés en provenance de régions où l'espèce est présente dans des conditions plus xériques qu'actuellement en région méditerranéenne, est utopique malgré la mise en évidence de l'existence de transports de

Fig. 2 : Performances comparées de croissance en hauteur (abscisse) et résistance à la sécheresse (ordonnée) chez le cèdre de l'Atlas. Compilation de données de plusieurs plantations comparatives du sud de la France (d'après Lefèvre, non publié). Les cercles grisés représentent un ensemble non différencié de provenances.



Photo 1 :

Dépérissements de sapin pectiné (*Abies alba*) dans les aplombs sous le sommet du Ventoux après la canicule de 2003. L'autochtonie n'est pas une garantie de survie globale. En limite d'aire de répartition, les origines locales ne sont pas toujours les meilleures !

Photo Bruno Fady, mai 2010

gènes par graine et pollen sur de très longues distances (CLARK 1998). REHFELD *et al.* (2002), par exemple, ont montré que les génotypes de pin sylvestre présents à l'heure actuelle en Eurasie ne sont pas ceux qui seront le mieux adaptés au climat du futur. Si les génotypes les plus septentrionaux devraient pouvoir profiter du réchauffement global moyennant un temps d'adaptation qui ne devrait pas dépasser l'ordre d'une seule génération, les génotypes les plus méridionaux ne devraient pouvoir s'adapter à leurs nouvelles conditions de vie qu'après un temps d'adaptation de l'ordre de treize générations, ce qui paraît irréaliste étant donné la vitesse du changement climatique.

Ces connaissances et ce contexte permettent de formuler une première option pour adapter (au sens génétique) la forêt méditerranéenne au changement climatique : la migration assistée intra-spécifique. Elle consiste à aller chercher des provenances (sous forme de graines) dans des endroits plus secs et chaud qu'actuellement et les introduire en quantité limitée lors de reboisements, en mélange avec les provenances recommandées classiquement, ou en supplément de la régénération naturelle lorsque c'est cette méthode qui est utilisée (la plupart des cas en région méditerranéenne). Cette option est souvent évoquée par les gestionnaires forestiers, et pas seulement pour la forêt méditerranéenne. A noter que cette option est différente de la migration assistée classiquement évoquée, qui consiste à installer des espèces nouvelles dans un environnement dans lequel elles ne sont actuellement pas présentes. La migration assistée intra-spécifique consiste en un renforcement de la diversité génétique de l'espèce en place, alors que la migration assistée consiste en une substitution d'essence. Les deux méthodes peuvent correspondre à des réponses graduées à des modifications environnementales de plus en plus sévères. La migration assistée, qu'elle soit intra-spécifique ou pas, suppose une révision de la politique actuelle en matière de recommandations sur le choix des matériels forestiers de reproduction, basée sur un découpage du territoire national en régions de provenance, dont la plus proche est par définition la plus recommandable en matière de reboisement. La migration assistée suppose aussi de résoudre la question du choix de ce nouveau matériel de reboisement à introduire, qui doit ne pas être trop mal adapté aux conditions climatiques actuelles

tout en l'étant pour les conditions futures. Peut-être faut-il imaginer la sélection d'un matériel végétal très diversifié, à la manière d'un système d'assurance multirisques...?

Maintenir la diversité génétique intra-population et renforcer l'adaptabilité locale

Si une grande variabilité génétique existe entre populations différentes d'une même espèce, dépassant parfois la variabilité qui peut exister entre espèces, toutefois l'essentiel de la diversité génétique réside dans les populations. Les études utilisant les marqueurs génétiques neutres nous enseignent qu'entre 80 et 90% de la variabilité génétique présente chez une espèce forestière se trouve en fait entre individus d'une même population, le reste se retrouvant entre les différentes populations de l'aire de répartition de l'espèce. Du fait de l'adaptation locale, on pourrait s'attendre au contraire à ce que des caractères liés à la survie et la croissance soient moins variables dans les populations qu'entre populations différentes. Néanmoins, des caractères phénotypiques procurant un avantage sélectif comme le débourrement ou la résistance à la sécheresse demeurent très variables localement entre individus d'une même population. C'est par exemple ce qui a été démontré par SAGNARD *et al.* (2002) chez le sapin pectiné du sud-est de la France. La variabilité génétique de caractères comme la croissance, le débourrement végétatif et la résistance à la sécheresse demeure largement plus faible, voire non significative, entre populations différentes qu'entre individus d'une même population. Ainsi, en l'absence prolongée d'arrosage, plus de 80% des semis d'un test de pépinière sont morts (ce qui n'est pas surprenant !) sans qu'il y ait de différences significatives entre les populations d'origine alpines, liguriennes ou sub-méditerranéennes (ce qui est beaucoup plus surprenant !). Ce sont les descendants de familles bien particulières dans chacune de ces régions qui ont résisté à la sécheresse (Cf. Photo 2), démontrant par-là l'origine génétique de cette résistance, sa transmission possible d'une génération à l'autre et le caractère très local du fonctionnement de la sélection naturelle.

C'est de l'existence même de cette forte diversité génétique intra-population que découle la deuxième option pour adapter (au sens génétique) la forêt méditerranéenne au changement climatique : maintenir la diversité génétique locale (CRGF 2008). Dans de nombreuses forêts en région méditerranéenne, l'introduction de matériel forestier sous forme de migration assistée peut ne pas être possible ou souhaitable. C'est le cas lorsqu'il n'existe pas de régions de provenance définies, lorsque le reboisement est impossible (zones protégées) ou non souhaité (espaces pour lesquels la gestion forestière par reboisement n'est pas rentable). Dans tous ces cas, la régénération naturelle reste le mode unique de gestion forestière. Le forestier peut intervenir pour favoriser le maintien de cette diversité. En intervenant sur la densité locale, sur le nombre de semencier et leur agencement dans l'espace, en favorisant la régénération, le forestier intervient sur la structuration de la diversité génétique (SAGNARD *et al.* 2011). En favorisant les mélanges, en choisissant de garder ou de supprimer les individus isolés, là encore le forestier peut maintenir la diversité génétique (ANSELME *et al.* 2010) et donner à la sélection naturelle ce carburant (la diversité génétique) dont elle a besoin pour favoriser l'adaptation locale lorsque les conditions de milieu changent (CRGF 2008).

La question qui se pose actuellement aux chercheurs et aux gestionnaires est : existe-t-il suffisamment de variabilité génétique dans les populations naturelles d'arbres forestiers, après des siècles de gestion forestière pas toujours raisonnée, et alors que les forêts ont et auront à faire face à des changements considérables de leur milieu, pour espérer une sélection naturelle efficace dans un laps de temps relativement court. C'est de l'ampleur de la variabilité génétique pré-existante localement que va dépendre la capacité des forêts méditerranéennes à s'adapter. Tout l'enjeu des projets scientifiques actuels impliquant l'analyse de gènes adaptatifs (dont l'accessibilité est de plus en plus grande grâce aux progrès considérables de la biologie moléculaire de ces dernières années) est de déterminer comment cette variabilité se structure à l'échelle locale et à celle des massifs forestiers et si cette variabilité peut être mobilisée pour répondre aux effets du réchauffement climatique.

Réfléchir à des pratiques de gestion plus "adaptatives" pour conserver et continuer à



utiliser la forêt méditerranéenne est une nécessité. Prendre en compte les populations marginales (là où des conditions environnementales sont déjà présentes et peuvent avoir favorisé des adaptations locales intéressantes), mettre en place des sylvicultures favorisant des mosaïques démographiques (densité et agrégations variables, mélanges d'espèces), voire développer la migration assistée (consistant à faire venir ce qui n'est pas encore présent) sont quelques pistes possibles offertes à la gestion forestière. Rapidement mettre en place ces stratégies dans tous les massifs forestiers permettra de renforcer la diversité génétique des populations naturelles, un des meilleurs moyens pour permettre aux forêts de s'adapter (au sens non génétique du terme) aux pressions nouvelles (dont l'ampleur reste mal appréciée) exercées par un climat qui change.

Photo 2 :

Mortalité de différentes familles de sapin pectiné (*Abies alba*) issues de différentes provenances du sud-est de l'aire de répartition française après deux mois d'absence d'arrosage en pépinière. Les descendants verts sont vivants. Le plus souvent groupés par lots de quelques individus, ils appartiennent à des familles issues de provenances différentes.
Photo Bruno Fady, juin 2006

B.F.

Bibliographie

- Anselme B, Bousquet F, Lyet A, Etienne M, Fady B, Le Page C, 2010. Modelling of spatial dynamics and biodiversity conservation on Lure Mountain (France). *Environmental Modelling & Software* 25(11), 1385-1398.
- Austerlitz F, Mariette S, Machon N, Gouyon PH, Godelle B, 2000. Effects of colonization processes on genetic diversity: differences between annual plants and tree species. *Genetics* 154: 1309-1321.
- Bariteau M, 1992. Variabilité géographique et adaptation aux contraintes du milieu méditerranéen des pins de la section *halepensis* : résultats (provisoires) d'un essai en plantations comparatives en France. *Annals of Forest Science* 49, 261-276.

Bruno FADY
INRA – UR629,
Ecologie des Forêts
Méditerranéennes
(URFM), Avignon,
France
Courriel :
bruno.fady@avignon.
inra.fr

Remerciements

Cet article a bénéficié de nombreuses discussions au fil des mois avec mes collègues de l'URFM et de l'UEFM de l'INRA d'Avignon ainsi qu'avec les membres de la Commission nationale pour la conservation des ressources génétiques forestières.

Clark JS, 1998. Why trees migrate so fast: Confronting theory with dispersal biology and the paleorecord. *American Naturalist* 152, 204-224.
CRGF, 2008. Préserver et utiliser la diversité des ressources génétiques forestières pour renforcer la capacité d'adaptation des forêts au changement climatique. Commission Ressources Génétiques Forestières, Ministère de l'Agriculture et de la Pêche, Paris.
IPCC, 2007: *Climate Change 2007: Synthesis Report*. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, Pachauri, R.K and Reisinger, A. (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 104 pp.

Sagnard F, Barberot C, Fady B, 2002. Structure of genetic diversity in *Abies alba* Mill. from southwestern Alps: multivariate analysis of adaptive and non-adaptive traits for conservation in France. *For. Ecol. Manag.*, 157, 175-189.
Sagnard F, Oddou-Muratorio S, Pichot C, Vendramin GG, Fady B, 2011. Effect of seed dispersal, adult tree and seedling density on the spatial genetic structure of regeneration at fine temporal and spatial scales. *Tree Genetics and Genomes* 7, 37-48.
Vendramin GG, Fady B, González-Martínez SC, Hu FS, Scotti I, Sebastiani F, Soto A, Petit RJ, 2008. Genetically depauperate but widespread: the case of an emblematic Mediterranean pine. *Evolution*, 62(3), 680-688.

Résumé

Que peuvent faire les arbres forestiers et leurs écosystèmes en réponse aux changements climatiques qui s'installent sur la longue durée ? Lorsque leur milieu change de façon conséquente, les arbres forestiers, comme tous les organismes vivants, peuvent mettre en place trois grandes stratégies pour y faire face : s'acclimater, s'adapter et/ou fuir. L'acclimatation (ou plasticité phénotypique) est le processus lié à l'existence d'exigences écologiques flexibles, qui permet aux individus ayant la même composition génétique de survivre, de continuer à pousser et à se reproduire dans une gamme d'environnements variables. L'adaptation au sens génétique du terme est le processus qui conduit à un changement de composition génétique d'une génération à l'autre sous l'effet de la sélection naturelle. Enfin, la "fuite" par la migration est le processus par lequel les graines (et le pollen) se dispersent au loin et germent (ou féconde un ovule dans le cas du pollen) dans des conditions plus favorables que celles dans lesquelles se trouve l'arbre qui les a émises (graines et pollen).

Les espèces d'arbres forestiers sont plus ou moins plastiques, s'adaptent plus ou moins rapidement et peuvent se disperser plus ou moins loin. C'est ce qui déterminera leur destin sous changement climatique. Ce qui reste assez difficile à prédire. Dans cet article, les perspectives offertes par le mécanisme de l'adaptation sont passées en revue, de même que ses limites. Il en découle des conséquences en termes de stratégies sylvicoles qui doivent être prises en compte et mises en place rapidement pour permettre une gestion « adaptative » des forêts méditerranéennes.

Summary

Climate change and its effects on Mediterranean forests: genetic aspects

What can forest trees and their ecosystems do faced with long-lasting climate change over the long term? When their habitat changes significantly, forest tree species, like any other living organism, can counter in three main ways: acclimatise, adapt and/or leave. Acclimatisation (or phenotype flexibility) is the process related to the existence of flexible ecological demands which enables individuals having the same genetic make-up to survive, continue to grow and reproduce in a range of variable environments. Adaptation in the genetic meaning of the term is the process that leads to a change in genetic composition from one generation to the next through the effect of natural selection. And lastly, leaving by migration is the process by which seeds (and pollen) disperse at a distance and germinate (or fertilise an ovum in the case of pollen) in conditions that are more favourable than those prevailing where the tree that produced the seeds or pollen is located.

Forest tree species are more or less flexible, adapt more or less rapidly and are able to spread near or much farther away. These factors are what will determine their destiny in the face of climate change. And this is difficult to predict. This article gives an overview of the perspectives opened up by the mechanisms of adaptation, along with their limits. This information has consequences for silvicultural strategy which should be taken into account and implemented forthwith in order to facilitate the "adaptive" management of Mediterranean forests.

Riassunto

Cambiamenti climatici e il loro effetto sulle foreste mediterranee : aspetti genetici

Che cosa possono fare gli alberi forestali e i loro ecosistemi in risposta ai cambiamenti climatici che si installano sulla durata lunga ? Quando il loro ambiente cambia in modo importante, gli alberi forestali, come tutti gli organismi vivi, possono mettere in posto tre grandi strategie per affrontargli : acclimatarsi, adattarsi e/o fuggire.

L'acclimatazione (o plasticità fenotipica) è il processo legato all'esistenza di esigenze ecologiche flessibili, che permettono agli individui che hanno la stessa composizione genetica di sopravvivere, di continuare a crescere e a riprodursi in una gamma di ambienti variabili. L'adattamento al senso genetico del termine è il processo che conduce a un cambiamento di composizione genetica da una generazione all'altra sotto l'effetto della selezione naturale. Finalmente, la « fuga » dalla migrazione è il processo dal quale i semi (e il polline) si spargono lontano e germogliano (o fecondano un'ovule nel caso del polline) nelle condizioni più favorevoli di quelle nelle quali si trova l'albero che le ha emesse (semi e pollini). Le specie di alberi forestali sono più o meno plastici, si adattano più o meno rapidamente e possono spargersi più o meno lontano. È questo che determinerà il loro destino sotto cambiamento climatico. Questo rimane abbastanza difficile a predire. In questo articolo, le prospettive offerte dal meccanismo dell'adattamento sono passate in rassegna, come pure i suoi limiti. Ne deriva conseguenze in termini di strategia silvicola che devono essere prese in conto e messe in posto rapidamente per permettere una gestione « adattativa » delle foreste mediterranee.

Les grandes orientations d'adaptation au changement climatique : point d'étape

par Myriam LEGAY

Trois ans après le colloque de 2007 et les premières propositions d'orientations d'adaptation de la sylviculture au changement climatique, où en sommes-nous ?

L'auteur se propose dans cet article de faire un point d'étape sur l'avancement des réflexions sur le sujet et sur les premières mesures opérationnelles : évaluation de la vulnérabilité, composition des peuplements, gestion dynamique, maîtrise de l'impact des crises, suivi des effets...

Quelques années après avoir proposé les premières orientations d'adaptation au changement climatique (LEGAY et MORTIER 2006), déclinées dans le contexte méditerranéen dans le cadre du premier colloque « changement climatique et forêt méditerranéenne » (LEGAY et LADIER 2008), faisons le point sur l'avancement du travail et des réflexions. Avons-nous réellement traduit ces orientations en mesures opérationnelles ? Sinon, quels sont les points de débat et les verrous ?

Evaluer la vulnérabilité des peuplements

Le premier axe d'adaptation, structurant l'ensemble de la démarche, concerne le diagnostic de la vulnérabilité des peuplements. Pour le poser, connaissances pratiques et approches développées par la recherche doivent être mobilisées et associées.

Sur le plan pratique, un effort considérable de classification, description et cartographie des conditions écologiques des forêts a été déployé au cours des trente dernières années. De nombreux catalogues de stations forestières ont été élaborés, pour décrire les différents types de stations rencontrées dans les petites régions considérées. L'importance du travail effectué peut être aisément appréciée en consultant le site de l'IFN¹, sur lequel on peut visualiser le territoire couvert par ces études, et télécharger la plupart des documents.

1 - Consulter le site de l'IFN, à l'adresse <http://www.ifn.fr/>, rubrique « activités thématiques » : typologie des stations forestières.

Le retour d'expérience sur les cartographies de stations met en évidence des résultats plus satisfaisants dans la description des gradients nutritionnels que dans la caractérisation du régime hydrique, plus difficile à appréhender, et pour laquelle des progrès restent à faire dans les méthodes de terrain (détermination de la profondeur de sol prospectée par les racines), dans la connaissance des propriétés physiques des sols forestiers (capacités de rétention en eau en fonction des textures), et dans la prise en compte de l'ensemble du système hydrique sol-peuplement-atmosphère (approche par bilan hydrique). Différents projets sont actuellement soutenus par le réseau mixte technologique AFORCE pour rechercher des avancées sur plusieurs de ces axes².

Les catalogues de stations sont des référentiels locaux, souvent typologiques, qui appréhendent globalement les effets du sol, de la topographie et du mésoclimat. Les choix méthodologiques ainsi adoptés, à une période où la station était considérée comme invariante, présentent un triple handicap pour raisonner sur l'adaptation au changement climatique. Tout d'abord, l'adoption d'un cadre géographique très fin, celui de la petite région IFN (de l'ordre de 50000 ha de surface forestière), revient à évacuer l'explicitation de l'effet du climat, qui peut pratiquement être considéré comme homogène au sein du périmètre d'étude (sauf gradients altitudinaux). La démarche typologique, en appréhendant globalement l'effet de tous les facteurs, renforce encore la difficulté d'isoler les effets d'un climat que l'on découvre variable, des effets des facteurs locaux de topographie et de sol. Nous avons souligné il y a quatre ans l'originalité des catalogues méditerranéens, entrepris plus tard, et avec des méthodes analytiques qui les rendent plus aisément adaptables.

Enfin, pour boucler un panorama complet de la vulnérabilité des peuplements en s'appuyant sur ces référentiels, il faudrait mener autant de chantiers qu'il y a de référentiels locaux. L'objectif semble démesuré par rapport aux moyens mobilisables : la couverture nationale n'a jamais été complètement achevée, et sur les nombreux référentiels répertoriés, seulement quelques unités tout au plus³ abordent actuellement la question du changement climatique, correspondant à une proportion minimale de la surface forestière. Un certain consensus s'établit autour de la possibilité d'harmoniser les référentiels sta-

tionnels à des régions plus vastes, délimitées par l'IFN au cours des trois dernières années et tout récemment mises à la disposition des utilisateurs : les sylvoécotones (SER). Si ce nouveau découpage a le mérite notoire de diviser potentiellement le travail par trois, il n'en reste pas moins que l'approche procédant par découpage géographique élude dans son principe même l'explicitation des effets du climat (qui reste peu variable au sein d'une SER). Elle ne permet généralement pas les comparaisons entre stations distantes de plusieurs centaines de kilomètres, alors que ce type d'approche pourrait être fort utile au praticien pour se projeter dans le futur par la recherche de climats analogues au climat futur projeté dans sa région.

C'est pourquoi il est indispensable de compléter cette vision locale par des approches à l'échelle de l'ensemble du territoire national, voire de l'aire de répartition de l'espèce, qui permettent d'explicitier les effets du climat sur ses performances. Pour cela, une première méthode consiste à décrire statistiquement la relation entre les performances de l'espèce (distribution ou croissance) et les conditions du milieu : on parlera de modèle de niche, en référence au concept de « niche écologique » formulé par HUTCHINSON (1957). Simples dans leur principe, les modèles de niche peuvent être développés de façon systématique, sous réserve de la disponibilité des données requises, et constituent donc un outil opérationnel pour l'adaptation. Malheureusement, les données ne sont pas toujours aisément mobilisables : si des modèles spatialisés de climat, ou encore de représentation du relief, sont disponibles, les caractéristiques du sol — plus variables à une échelle fine — ne sont pas aussi accessibles. Ainsi les cartographies de station ne fournissent pas de données analytiques agrégables à l'échelle de l'ensemble du territoire, telles que la profondeur du sol, ou la réserve utile. Par ailleurs, les moyens humains pour entreprendre ce développement systématique de modèles font défaut : les chercheurs qui les développent n'ont pas pour vocation d'appliquer de façon systématique la même méthodologie. Quant aux gestionnaires, ils s'organisent peu à peu, mais avec des moyens très limités.

Complémentaire de l'approche par les niches climatiques, qui étudie la réponse de l'espèce aux variations spatiales du milieu, une autre façon d'aborder l'effet du climat

2 - Informations disponibles sur le site du réseau, à l'adresse : <http://www.foretprivée-francaise.com/acceuil-161899.html>.

3 - C'est le cas au moins du guide pour l'identification des stations et le choix des essences en Argonne (PERRIER, 2007) et du guide pour les forêts des montagnes de l'Ain (JOU, 2006)

sur les performances des espèces forestières consiste à étudier l'effet des variations du climat dans le temps. Le suivi de quelques peuplements très instrumentés⁴, et l'acquisition de séries chronologiques de mesures de leurs paramètres physiologiques en réponse aux variations des paramètres climatiques au fil des heures et des saisons a permis de développer des modèles de réponse des différents processus (respiration, fixation du carbone, croissance...) à ces paramètres, puis d'assembler ces processus élémentaires dans des modèles capables de simuler la réponse de l'espèce aux conditions climatiques. On parle de modèles basés sur les processus. Ces modèles, développés en France pour quelques grandes essences, permettent actuellement de représenter la fixation nette de carbone, ou la production de biomasse, en fonction du climat, mais ne sont pas encore à même de reproduire les seuils critiques de dysfonctionnement et de mortalité en réponse à un événement extrême.

Une troisième approche, développée notamment par Michel BECKER à l'INRA de Nancy à partir des années 80, s'attache spécifiquement à ces accidents, et analyse les cas de dépérissements. Quelques cas d'école sont ainsi très connus des forestiers. L'étude des cernes de croissance des sapins dépérissant des Vosges, lors de l'épisode « des pluies acides », a fourni un des premiers cas documentés en Europe d'augmentation de la productivité des peuplements au cours du XX^e siècle (BECKER, 1987). L'étude du dépérissement du chêne à Tronçais dans les années 80 a mis en évidence les différences écologiques entre chêne sessile et chêne pédonculé, et le délai parfois de plusieurs années, entre un accident climatique et la mortalité des chênes fragilisés (BECKER et LÉVY, 1982). Le dépérissement de la Harth, dans les années 90, a confirmé la vulnérabilité du chêne pédonculé à la sécheresse, et permis de mettre en évidence des seuils de déficit hydrique entraînant le dépérissement (BRÉDA, 1999).

Notons que des avancées scientifiques ont été apportées au cours de ces quatre dernières années en matière de modélisation du comportement des essences. Dans le cadre du programme QDiv⁵, a été développé une comparaison des simulations par différents types de modèles — modèles de niches ou modèles basés sur les processus — de l'évolution de la distribution de quelques grandes espèces d'arbres au réchauffement climatique (Cf. article de V. Badeau, pp. 143-150).

Le projet Dryade⁶ s'est quant à lui attaché à comprendre les dysfonctionnements, à l'échelle de l'arbre ou du peuplement, sous l'effet des contraintes climatiques, biotiques, anthropiques et de leurs interactions, à travers cinq modèles d'étude : sapin en zone supra-méditerranéenne, douglas, chênaies mixtes, hêtraies de plaine, couple épicéa-scolytes. Les enseignements apportés par ces résultats scientifiques devraient pouvoir être tirés dans le courant de l'année 2011.

Au plan pratique, les gestionnaires se sont efforcés, dans les directives et schémas régionaux d'aménagement, de procéder à une première analyse de la vulnérabilité des peuplements des régions concernées, sur la base des résultats disponibles (et notamment ceux du projet Carbofor – LOUSTEAU ed., 2010) et des premières orientations d'adaptation proposées. La directive d'aménagement Rhône-Alpes, par exemple, a décliné cette analyse par essences, d'une part et par secteurs géographiques, d'autre part. Elle pointe ainsi la vulnérabilité de l'épicéa en dessous de 1000 m d'altitude, aggravée par le renforcement de l'activité des scolytes sous l'effet du réchauffement, et la vulnérabilité du sapin, aggravée par les attaques du gui (dont l'impact semble progresser sous l'effet du réchauffement, selon DOBBERTIN *et al.*, 2005). Les contextes stationnels rhône-alpins, où le réchauffement semble le plus critique sont : les forêts sur sols peu évolués, à faible réserve utile, les forêts collinéennes de plateaux, à basse altitude et les forêts du secteur méditerranéen de la région.

Il nous faut ainsi poursuivre cette analyse de la vulnérabilité, la faire évoluer en intégrant les nouveaux résultats, adapter nos outils de description des milieux pour les rendre capables d'intégrer explicitement les effets d'un climat variable, et les rendre plus performants pour appréhender la contrainte hydrique.

Faire évoluer la composition des peuplements

Ces progrès nous permettront d'organiser avec plus de pertinence la deuxième orientation d'adaptation, qui consiste à faire évoluer la composition des peuplements. Il faut prendre conscience qu'une telle action sera nécessairement très progressive et s'opèrera au

4 - Pour un aperçu de ces dispositifs, consulter le site du réseau F-ORE-T à l'adresse <http://www2.gjpecofof.org/f-ore-t/>.

5 - QDiv : « Quantification des effets des changements globaux sur la diversité végétale », programme financé par l'Agence Nationale de la Recherche.

6 - Dryade : « Vulnérabilité des forêts face aux changements climatiques : de l'arbre aux aires bioclimatiques », programme financé par l'Agence nationale de la recherche <http://www.inra.fr/dryade>

7 - Informations disponibles sur le site du réseau, à l'adresse <http://www.foretprivee-francaise.com/accueil-161899.html>.

fur et à mesure de la mise en régénération des peuplements — si elle s'accélère, ce ne peut être que sous l'effet de dépérissements effectifs. Si des orientations sont proposées au plan national, sur la base des études d'impacts mettant en évidence la vulnérabilité de certaines essences, si par ailleurs ces orientations sont précisées à l'échelle régionale dans les directives et schémas régionaux d'aménagement, il faut rappeler que la décision ultime est prise au niveau du massif, dans le cadre du plan d'aménagement qui prend en considération l'ensemble des enjeux locaux. Enfin, pour obtenir cette évolution, le forestier dispose d'un éventail de possibilités graduées, qui va de la régénération naturelle (qui permet une adaptation in situ par la sélection naturelle), à l'apport de nouveau matériel végétal, en passant par le dosage du mélange des essences en place.

Certaines évolutions de compositions sont dorénavant et déjà proposées par les Directives et schémas régionaux d'aménagement. La directive pour les Préalpes du Sud, par exemple, recommande de limiter le sapin aux stations les plus favorables (soit au dessus de 1300 m d'altitude en ubac et 1500 m en adret), et propose d'étendre le cèdre, résistant à la sécheresse, mais aussi à l'incendie, en favorisant son mélange avec des essences en place, comme le sapin ou le chêne pubescent. L'extension des sapins

méditerranéens est également envisagée, dans la limite de leur vulnérabilité aux gelées tardives.

D'une façon générale, l'analyse des directives régionales d'aménagement du secteur méditerranéen met en évidence des tendances et orientations communes. Il y apparaît que la maturation des couverts se poursuit, que ce soit dans les milieux ouverts, dont la fermeture par les pins progresse, dans les pineraies elles-mêmes, colonisées peu à peu par les feuillus (chêne vert, chêne pubescent, hêtre) et le sapin, qui s'y substituent à terme. Elle se manifeste également par le recul d'espèces anciennement favorisées par l'homme, comme le châtaignier ou le chêne-liège. Le souci des gestionnaires, dans un contexte de gestion généralement très extensif, est de comprendre et de maîtriser ces dynamiques, pour les orienter dans le sens qui leur paraît favorable à l'adaptation. La dynamique du hêtre vers les altitudes plus élevées leur paraît ainsi être un atout, tandis que la dynamique descendante du sapin dans les stations sèches est perçue comme un risque pour l'avenir.

D'une façon générale, le recul du sapin est attendu, voire progressivement organisé, et différentes espèces sont envisagées pour compenser son recul, notamment les cèdres, les sapins méditerranéens, et le pin laricio. Il est d'ailleurs significatif que le RMT AFORCE finance un projet sur l'installation et la conduite des peuplements de cèdres, et un autre sur l'évaluation des ressources génétiques du genre *Abies* utilisables pour faire face aux changements climatiques⁷.

Cette question de l'évolution de la composition des peuplements, centrale dans l'adaptation au changement climatique, est aussi au cœur des débats. Une opposition entre une confiance absolue à la nature (le forestier n'ayant qu'à veiller à la naturalité des peuplements), s'oppose à une vision très biotechnique, où il suffirait de maîtriser les paramètres de choix du matériel végétal. Les deux visions ont leur excès. Peut-on faire confiance à la nature pour assurer les besoins des hommes... surtout pour les prochaines décennies où il va falloir faire face à une crise de l'énergie dans laquelle le bois, matériau et source d'énergie, aura nécessairement un rôle majeur à jouer ? Qu'est-ce que la naturalité, dans le contexte d'un changement global du climat lié à l'activité humaine ?

Photo 1 :

Le sapin en zone supra-méditerranéenne : un des modèles d'étude du programme ANR Dryade (tourné dans le massif du Ventoux, mai 2008)
Photo M. Legay / ONF



Mais réciproquement, peut-on ignorer les limites d'une approche purement agronomique en forêt, compte tenu de la durée des cycles, de l'extensivité de la gestion et de la complexité du milieu géré ? Par ailleurs, les incertitudes mêmes qui affectent notre capacité à anticiper l'évolution du climat doivent nous inciter à une bonne dose de modestie et de pragmatisme.

Voilà pourquoi il faut poser le débat de façon globale et équilibrée, en prenant en compte l'ensemble des enjeux : production de biens, mais aussi de services, et d'aménités, maintien du fonctionnement des écosystèmes, conservation... Tous les discours simplistes risquent de retarder le débat de fond, préalable à une action sereine, alors que le temps presse. Les expériences passées de transfert d'espèces, notamment dans le cadre des arboretums, et essais de comparaison d'espèces et de provenances, doivent être mis à profit pour instruire le sujet, à charge (documenter les erreurs) et à décharge (documenter les succès).

Gérer dynamiquement les peuplements

En ce qui concerne la gestion des peuplements en place, la principale orientation d'adaptation consiste à dynamiser la sylviculture — c'est-à-dire à augmenter l'intensité des prélèvements en éclaircie — et généralement à raccourcir les durées de production. La motivation première de cette orientation (déjà ancienne à l'ONF, puisqu'une note de service interne en faisait déjà mention en 1996), est de prendre en compte l'augmentation de la productivité des peuplements. Une densité contrôlée est par ailleurs de nature à limiter l'exposition aux stress : en permettant des cycles de production plus courts, elle permet de diminuer l'exposition au risque de vent (BOCK *et al.*, 2004). En limitant la surface de feuillage, elle permet d'améliorer le bilan hydrique. Globalement, une bonne gestion de la distribution des âges permet de limiter la proportion de peuplements vieillissants, généralement plus vulnérables aux accidents climatiques ou biotiques. En zone méditerranéenne, le vieillissement des sapinières du Pays de Sault est ainsi analysé par les forestiers comme un facteur prédisposant aux

dépérissements observés. Enfin, le raccourcissement des cycles de production tend à accélérer le renouvellement des peuplements, et donc de favoriser leur adaptation au climat changeant, que ce soit par sélection et adaptation spontanée dans les régénérations naturelles, ou bien par modification active de la composition du peuplement par le forestier. Par ailleurs, même s'il ne s'agit plus là d'adaptation, la dynamisation de la sylviculture est nécessaire pour produire plus de bois, matériau et source d'énergie stratégique pour limiter le recours au carbone fossile.

La dynamisation de la sylviculture a moins d'importance en zone méditerranéenne, où la sylviculture est généralement extensive, que dans les grands bassins de production du nord de la France. Cela pose d'ailleurs le problème du financement de l'adaptation dans les forêts de faible rentabilité. Cependant, cette orientation est posée aussi en zone méditerranéenne sensu lato pour une essence productive comme le sapin, pour lequel une réduction des âges et diamètres d'exploitabilité est préconisée. Dans ce cas, une motivation supplémentaire s'ajoute à la liste ci-dessus : l'adaptation à la demande industrielle pour des bois de diamètre limité.

Au moins autant que la modification planifiée de la composition des peuplements, la dynamisation de la sylviculture suscite discussion. Ce débat engage probablement plus la communauté professionnelle que le grand public, mais il correspond à des enjeux sociaux immédiats. Quel équilibre trouver entre la dynamisation de la sylviculture et la préservation des stades sénescents, dans laquelle la forêt publique s'est engagée au cours de la décennie précédente, par exemple avec la préservation d'îlots de vieux bois, ou le maintien d'arbres sénescents au sein des peuplements gérés ? Comment régler et piloter cette augmentation des prélèvements, alors que l'on sait la productivité en hausse, certes, mais aussi très fluctuante et probablement contrecarrée à moyen terme par l'aggravation de la contrainte hydrique ? Une appréciation robuste et fine des stocks de bois sur pied, de leur répartition dans l'espace et de leur évolution dans les temps s'est ainsi imposée récemment comme une question de premier plan.



Photo 2 :
Dépérissement de sapins
dans la vallée de la Tinée
(06)
Photo J.Ladier /ONF

Gérer les risques

Un dernier axe d'adaptation consiste enfin à chercher à limiter les risques ou maîtriser les impacts des crises. Nous avons en particulier mis l'accent, lors de notre analyse initiale, sur la nécessité, dans un contexte de demande de bois accrue, de préserver le capital sol, en évitant le tassement lié aux exploitations, et en raisonnant les exportations d'éléments minéraux pour préserver la fertilité minérale des sols pauvres. Si les risques de tassement ou d'appauvrissement des sols concernent a priori relativement peu la zone méditerranéenne, d'autres risques sont susceptibles d'y augmenter sous l'effet du réchauffement, comme l'incendie, ou encore les phénomènes d'érosion des sols. Quant au risque de dépérissement des peuplements, c'est déjà une réalité, mesurable dans un dispositif comme l'Observatoire des dépérissements des Alpes-Maritimes, (Cf. article de Guy Maréchal et Jean Ladier, pp. 135-140). Face à ce risque, le forestier n'a pas d'autres outils d'adaptation que ceux déjà présentés : adaptation de la sylviculture et changement progressif de la composition. En cela, l'adaptation en forêt se présente de façon très différente de l'adaptation en agriculture, où l'on peut jouer sur des paramètres cultureux liés à l'annualité des cultures et à l'intensivité de la gestion agricole (dates des stades cultureux, modalités d'irrigation..., BRISSON et LEVRAULT ed., 2010).

En matière de maîtrise des risques et de leurs impacts, la principale marge de progrès identifiable semble être dans la gestion de crise. Sous l'effet de la série dense d'événements climatiques extrêmes qui ont émaillé la dernière décennie, initiée par la tempête de 1999, des outils de gestion de crise ont été mis en place à l'ONF. Plus récemment, un partenariat entre forestiers publics et privés, Inra et Département de la Santé des Forêts a permis d'élaborer un guide de gestion des forêts en crise sanitaire. En effet, ces crises qui apparaissent et se développent lentement, présentent des difficultés spécifiques qui méritaient d'être prises en considération. Il y a encore certainement d'énormes progrès à faire dans la gestion des risques et dans le développement de notre aptitude à y faire face, par exemple dans la prise en compte des risques combinés, et des interactions entre modifications des peuplements (dépeuplement, changement de composition) et modifications du régime des perturbations climatiques, qu'il s'agisse de sécheresse ou d'épisodes de pluies intenses.

Suivre en continu les effets des changements climatiques

Enfin, suivre en continu la réponse des peuplements aux effets des évolutions du climat, reste d'une impérieuse nécessité. Le monitoring doit être considéré comme une dimension de la gestion forestière durable. La contribution de l'ONF consiste principalement en la mise en œuvre du réseau RENE-COFOR, et en la participation, aux côtés de la forêt privée, au réseau des correspondants observateurs, animé par le Département de la Santé des Forêts. Dans un contexte de moyens économiques limités, il faut se concentrer sur les dispositifs existants, qui seuls permettent d'interpréter les crises à la lumière d'un historique de suivi suffisamment long. Les initiatives nouvelles doivent rechercher la complémentarité avec les grands réseaux nationaux existants, et en ce sens, l'Observatoire des Alpes-Maritimes, qui permet de mieux caractériser les dépérissements à l'échelle régionale, est un exemple convainquant.

Quatre ans après l'état des lieux initial, un constat très positif peut être posé : la communauté professionnelle est mobilisée et

solidaire, comme le montre par exemple l'activité du réseau mixte technologique AFORCE. Cependant, les avancées sont ralenties par les moyens limités impartis à la recherche et au développement, soumis à une brutale inflation des questions soulevées par le changement climatique : connaissance de la productivité et de ses variations, outils et données pour le diagnostic écologique, besoins et comportement des essences, caractérisation du régime hydrique, économie de la production en situation de risque... L'adaptation d'une activité extensive et de long terme, comme la gestion forestière, reste une gageure, face à des marges d'incertitudes qui demeurent très importantes... et qui ne se réduisent pas nécessairement avec le progrès des connaissances, qui contribue plutôt actuellement à mieux les évaluer. Mais cette gageure n'est pas fondamentalement différente des difficultés intrinsèques à l'activité forestière et ne doit ni effrayer ni décourager.

M.L.

Bibliographie

- Becker, M. (1987). Santé de la forêt : le sapin témoin. *La Recherche* 18, 1097-1098.
- Becker, M. & Lévy, G. (1982). Le dépérissement du chêne en forêt de Tronçais : les causes écologiques. *Annales des Sciences Forestières*. 39(4), 439-444.
- Bock, J., Vinkler, I., Duplat, P. & Renaud, J.P. (2004). Stabilité au vent des hêtraies : les enseignements de la tempête de 1999 dans le nord-est de la France. *Rendez-Vous techniques* 3.
- Brisson, N., Levraut, F., ed. (2010). *Changement climatique, agriculture et forêt en France : simulations d'impacts sur les principales espèces. Le Livre vert du projet CLIMATOR (2007-2010)*, ADEME Editions, Paris.
- Bréda, N. (1999). Le rôle clé des déficits hydriques dans le dépérissement des chênaies en forêt de la Harth (Alsace du Sud) établi par une analyse dendroécologique et écophysologique. *Les Cahiers du DSF*, 92-94.
- Dobbertin, M., Hilker, N., Rebetz, M., Zimmermann, N., Wohlgenuth, T. & Rigling, A. (2005). The upward shift in altitude of pine mistletoe (*Viscum album* ssp. *austriacum*) in Switzerland – the result of climate warming? *International Journal of Biometeorology* 50, 40-47.
- Joud, D. (2007). *Guide pour les forêts des montagnes de l'Ain (Bugey, Haut-Jura, Revermont)*. CRPF Rhône-Alpes.
- Legay, M. & Ladier, J. (2008). La gestion forestière face aux changements climatiques : premières orientations d'adaptation en forêt publique - Le cas des forêts méditerranéennes. *Forêt Méditerranéenne* 29 (2), 221-234.
- Legay, M. & Mortier, F. (2006). La forêt face au changement climatique - adapter la gestion forestière. *Les dossiers forestiers* 16, ONF.
- Lousteau, ed. (2010). *Forests, Carbon Cycle and Climate Change*. Quae Editions.
- Perrier, C. (2007). *Guide pour l'identification des stations et le choix des essences en Argonne*. CRPF Champagne-Ardenne et CRPF Lorraine-Alsace.
- Prochasson, A. & Gauquelin, X. (2006). *Directive régionale d'aménagement Rhône-Alpes*. ONF.
- Simon-Teissier, S. (2006). *Directive régionale d'aménagement Méditerranée-Provence-Alpes-Côte d'Azur, Préalpes du Sud*. ONF.

Myriam LEGAY
Office national
des forêts
Responsable du Pôle
R&D de Nancy
Bât 802 - Les Merises
54840 Velaine-en-
Haye
Tél. : 03 83 23 45 05
Mél :
myriam.legay@onf.fr

Résumé

Face aux impacts attendus du changement climatique, la plupart des mesures envisageables pour adapter la forêt et la gestion forestière se ramènent aux thèmes suivants :

- Quels seront les peuplements les plus vulnérables ?
- Faut-il entreprendre la modification de leur composition en espèces, et comment ?
- Faut-il faire évoluer le niveau ou les modalités des récoltes ?
- Peut-on, en limitant les stress non directement liés au changement climatique, limiter la vulnérabilité des écosystèmes ?
- Quelles dispositions prendre pour maîtriser les effets des crises liées à la dérive climatique ou aux événements climatiques extrêmes ?
- Comment suivre en continu les effets de l'évolution du climat et des accidents climatiques sur le fonctionnement et la composition des écosystèmes, et quel effort y consacrer ?

Pour chacun de ces axes, cet article décrit l'avancement de la réflexion en France, à l'aide d'exemples concrets empruntés à différents contextes. Il met en évidence les incertitudes, les débats soulevés, et les différents verrous – de connaissance ou de mise en œuvre – identifiées.

Summary

Main orientations in adapting to climate change: progress report

Faced with the expected impact of climate change, most of the measures that can be envisaged for adapting forests and forestry management boil down to the following topics:

- Which stands will be most vulnerable?
- Should we undertake to modify their species composition and, if so, how?
- Should we progressively change the amounts harvested and the harvesting parameters?
- Can we, by limiting stress not directly linked to climate change, limit the vulnerability of ecosystems?
- What measures are needed to control the impact of crises linked to climate change or to extreme climatic events?
- How can ongoing monitoring be done of the effects of the evolution in climate and climatic incidents on the functioning and make-up of ecosystems, and what efforts should be devoted to it?

For each of these topics, this article details the way reflection is progressing in France, using concrete examples taken from different contexts. It highlights the uncertainties, the ensuing debates and the various known hindrances –related to knowledge or to implementation

Riassunto

I grandi orientamenti di adattamento al cambiamento climatico : punto di tappa

Di fronte agli impatti aspettati del cambiamento climatico, la maggior parte delle misure progettabili per adattare la foresta e la gestione forestale se riducono ai termini seguenti :

- Quali sono i popolamenti più vulnerabili ?
- Bisogna intraprendere la modificazione della loro composizione in specie e come ?
- Bisogna fare evolvere il livello o le modalità delle raccolte ?
- Possiamo, limitando gli stress non direttamente legati al cambiamento climatico, limitare la vulnerabilità degli ecosistemi ?
- Quale disposizioni prendere per domare gli effetti delle crisi legate alla deriva climatica o agli eventi climatici estremi ?
- Come seguire in continuo gli effetti dell'evoluzione del clima e degli incidenti climatici sul funzionamento e la composizione degli ecosistemi, e quale sforzo consacrarci ?

Per ognuno di questi assi, questo articolo descrive l'avanzamento della riflessione in Francia, con l'aiuto di esempi concreti tratti da diversi contesti. Mette in evidenza le incertezze, le discussioni sollevate, e i diversi catenacci – di conoscenza o di messa in opera – identificabili.

Les forêts mélangées en région méditerranéenne : quels bénéfices et comment créer le mélange ?

par Bernard PRÉVOSTO et Christian RIPERT

Face aux nouvelles menaces liées, entre autres, aux changements climatiques, les forêts mélangées sont devenues un enjeu majeur de la gestion forestière.

Les auteurs passent en revue les différents bénéfices que pourraient apporter ces forêts mélangées, tout particulièrement dans le contexte spécifique des forêts méditerranéennes.

Mais comment créer et maintenir le mélange ?

Depuis quelques années, les forêts mélangées font l'objet d'une attention, elles sont en effet parées de nombreux avantages, réels ou supposés. De ce fait, elles constituent des objectifs sylvicoles vers lesquels le gestionnaire sera tenté d'aller afin d'atténuer ou de diluer les risques potentiels qui peuvent compromettre l'avenir des peuplements.

En 2007, gestionnaires, techniciens et chercheurs se sont réunis autour de cette question lors des ateliers REGEFOR (Ateliers Recherche et Gestion Forestière) organisés à Nancy. De multiples aspects sur les forêts mélangées ont été abordés lors de ces ateliers, mais les forêts méditerranéennes n'ont pas fait l'objet d'un débat spécifique prenant en compte leur composition, leurs conditions environnementales, leur gestion et les risques particuliers liés à ces forêts. Dans cet article, après avoir rappelé comment les forêts mélangées pouvaient être définies, nous passons rapidement en revue les principales interrogations sur ces peuplements en zone méditerranéenne : sont-ils plus productifs ? Favorisent-ils la biodiversité ? Sont-ils plus résilients notamment face au risque d'incendie ? Comment peut-on créer le mélange lorsque les peuplements sont purs ?

Comme le mélange d'essences peut être extrêmement varié, l'accent sera mis sur le mélange pin-chêne qui est le plus fréquent en zone méditerranéenne.

Comment définir une forêt mélangée ?

L'IFN (Inventaire forestier national) définit la composition des peuplements à partir du rapport entre la projection des houppiers accédant à la lumière et la surface totale du site, variable appelée « taux de couvert libre » ou TCL (MORNEAU *et al.*, 2008). Cette variable peut être définie pour une essence (TCL_i pour l'essence i) ou pour tout le peuplement (TCL). Un taux de couvert libre relatif peut être ensuite calculé pour chaque essence (TCLR_i pour l'essence i) comme le rapport entre le taux de couvert libre de l'essence sur le taux de couvert libre total.

$$TCL_i = \frac{\sum_i \text{Houppier}_i}{\text{Surface_totale}} \times 100$$

TCL_i = Taux de couvert libre de l'espèce i
 Houppier_i = surface projetée d'un houppier libre d'un individu de l'espèce i
 Surface_totale = surface totale du site
 TCL = Taux de couvert libre du peuplement comprenant n essences
 $TCLR_i$ = Taux de couvert libre relatif de l'essence i

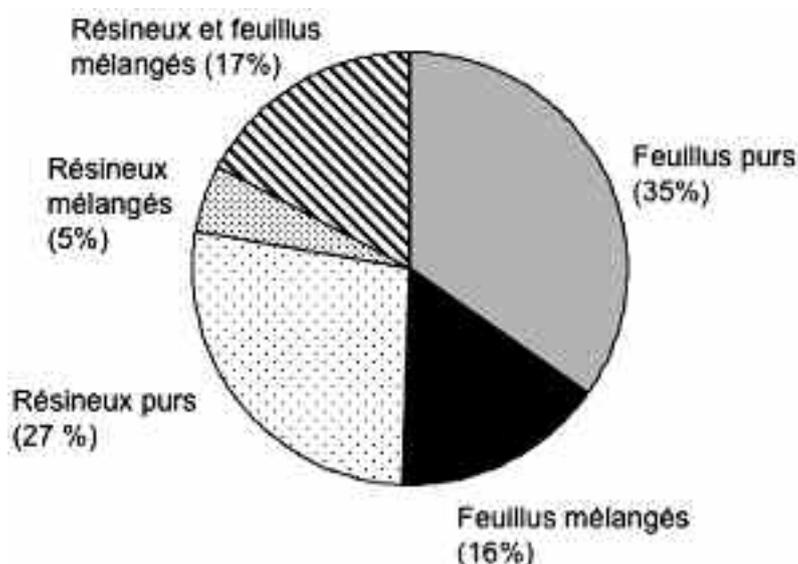
On pose alors les définitions suivantes :
 – si une espèce a un TCLR supérieur à 75% le peuplement est dit pur,

– s'il faut deux espèces pour atteindre ce taux de 75% le peuplement est dit mélangé à deux espèces, etc.

Sur la base de ces critères, la forêt française est mélangée pour 49% de sa surface, proportion équivalente en volume (MORNEAU *et al.*, 2008). Le mélange à deux essences est le plus répandu (69% des cas) et c'est le mélange entre feuillus qui domine (environ les 2/3 des forêts mélangées). En zone méditerranéenne, les peuplements purs dominent et les mélanges entre feuillus et feuillus/résineux sont à peu près équilibrés (Cf. Fig. 1). Les mélanges les plus fréquents concernent pour les résineux, le Pin sylvestre, le Pin d'Alep et le Pin maritime et pour les feuillus, le Chêne pubescent et le Chêne vert.

Le gestionnaire forestier adopte une définition plus souple qui intègre différentes structures de peuplement et différentes configurations spatiales. Ainsi, le peuplement pourra être mélangé parce qu'il y a une essence en strate haute et une autre en strate basse (par exemple un étage de pin surmontant un sous-étage de chêne). Le mélange pourra se faire pied à pied, en bouquets ou en parquets.

Fig. 1 :
Répartition des surfaces des 5 grandes compositions dans les forêts de production de la zone Sud-Est
Source IFN, 2010



Les forêts mélangées sont-elles plus productives ?

Les études sur les écosystèmes terrestres comprenant plusieurs espèces végétales ont montré généralement une relation positive entre le nombre d'espèces de l'écosystème et sa production ou sa productivité. Par exemple TILMAN *et al.* (2001) a noté, sur une expérimentation de plusieurs années sur des espèces prairiales, une biomasse 2,7 fois plus grande dans des parcelles comprenant 16 espèces que dans des parcelles avec une seule espèce. Cependant, ces études se sont focalisées sur les espèces herbacées rencontrées dans les prairies et les pelouses qui se prêtent beaucoup plus facilement à l'expérimentation que des écosystèmes avec des ligneux (HECTOR, 1999).

Plus récemment, en étudiant des garrigues près de Marseille (Chaîne de l'Etoile) composées de Chêne kermès, de Ciste blanc, de Romarin et d'Ajonc de Provence, MONTES *et al.* (2008) ont montré que la productivité augmentait linéairement avec la richesse en espèces. Ce résultat a aussi été mis en évi-

dence en Grèce sur des formations à Cistes (TROUMBIS et MEMTSAS, 2000). Qu'en est-il des forêts méditerranéennes ? Il existe encore très peu de travaux, mais une étude en Catalogne à partir de 5000 placettes permanentes (celles de l'IFN espagnol) a également montré que la production est plus forte dans les forêts mélangées à Pin d'Alep, Pin sylvestre et Chêne vert que dans les peuplements purs (VILA *et al.*, 2007).

Il semble donc que les formations végétales mélangées au sens large soient plus productives que les formations monospécifiques. Cet effet est habituellement expliqué par deux mécanismes :

- un effet échantillon : lorsque qu'on augmente le nombre d'espèces on augmente aussi statistiquement la probabilité d'avoir des espèces plus productives,

- un effet de complémentarité : dans les systèmes mélangés la compétition ne se fait pas systématiquement de la même façon et au même niveau que dans les formations pures. Par exemple, des systèmes racinaires appartenant à plusieurs espèces peuvent capter des ressources à différentes profondeurs dans le sol, alors que ce n'est pas le cas pour une seule espèce.

Cependant il convient de rester prudent sur la généralisation de ces conclusions aux systèmes forestiers : les études sont encore trop peu nombreuses et n'ont porté que sur quelques types de mélange. Il s'agit aussi d'études sur des peuplements en place combinant donc plusieurs facteurs du milieu, de structure et de composition forestières. Des biais méthodologiques sont alors possibles : par exemple les forêts mélangées peuvent être plus productives parce qu'elles sont situées dans des conditions stationnelles plus favorables, les études ne caractérisant pas nécessairement précisément la station, ou parce que l'historique de formation de ces peuplements est différent de celui des peuplements purs.

Les forêts mélangées sont-elles plus exposées aux attaques des ravageurs ?

Pour répondre à cette question, dans le cas des insectes, les chercheurs ont conduit une méta-analyse (analyse combinant plusieurs

travaux) de 119 études sur les dégâts imputés à 33 espèces d'insectes sur des forêts pures ou en mélange (JACTEL et BROCKERHOFF, 2007). Les résultats ont montré que le niveau de dégâts par les insectes spécialisés était nettement plus faible dans les peuplements mélangés que dans les peuplements purs. En revanche, les résultats sont plus nuancés dans le cas des insectes polyphages qui, contrairement aux précédents, peuvent s'attaquer à des arbres appartenant à diverses familles botaniques (JACTEL *et al.*, 2008).

Par exemple en Corse, la cochenille *Matsucoccus feytaudi* inféodée au Pin maritime est plus abondante dans les peuplements purs que dans les peuplements en mélange avec le Pin laricio.

Pour expliquer ce phénomène plusieurs processus sont évoqués (JACTEL *et al.*, 2008).

Le premier concerne la répartition des risques : plus le nombre d'espèces augmente dans une forêt et moins celle-ci est vulnérable à l'attaque de ravageurs ciblée sur une ou un petit nombre d'espèces. Le second tient au fait que les arbres susceptibles d'être attaqués sont moins accessibles par les ravageurs, les autres essences peuvent agir comme une barrière mécanique ou physico-chimique. De plus, le décalage phénologique existant entre les différentes espèces d'arbres dans une forêt mélangée est un obstacle à l'ajustement du cycle biologique du ravageur aux stades de développement de l'espèce cible. Enfin, il a été démontré que les forêts mélangées offrent des conditions favorables aux ennemis naturels des insectes ravageurs ou champignons pathogènes, permettant donc de mieux réguler leurs populations.

Les forêts mélangées favorisent-elles la biodiversité ?

De façon intuitive les peuplements mixtes devraient présenter une biodiversité plus forte parce qu'un mélange de plusieurs essences est plus susceptible de créer des conditions écologiques variées et donc d'abriter une diversité plus forte. Or cette assertion n'est pas nécessairement vérifiée. D'une part les travaux explorant le lien entre le mélange des peuplements et la biodiversité sont très peu nombreux et parcellaires et,

d'autre part, il existe une grande variabilité de situations. Ainsi, dans une analyse bibliographique sur l'influence de la composition de strate arborée sur la végétation de la strate basse en région tempérée et boréale, BARBIER *et al.* (2008) notent que le maximum de la diversité est souvent observé dans les peuplements résineux, plutôt que dans les peuplements mixtes. Selon la composante de la diversité analysée, les résultats sont variables, ainsi les résineux seraient plus favorables à la diversité des bryophytes que des plantes vasculaires.

En zone méditerranéenne, les travaux sont aussi très fragmentaires. La plupart ont analysé l'impact des grandes plantations de pin d'Alep sur la biodiversité en zone semi-aride (voir par exemple MAESTRE et CORTINA, 2004 pour le sud de l'Espagne ou GINSBERG, 2006 pour Israël). Les résultats ont montré une influence nettement négative du couvert pur du Pin d'Alep sur la flore qui est moins abondante et moins diversifiée que dans les zones ouvertes, le boisement artificiel freinant la dynamique d'installation des feuillus. Des résultats similaires ont été obtenus pour la faune bien que les études n'aient porté que sur quelques groupes. En particulier, la richesse de l'avifaune est moins élevée dans les peuplements de Pin d'Alep pur que dans les peuplements mixtes pin-chêne (DIAZ, 2006). BUSE *et al.* (2010) montrent également que la diversité en coléoptères saproxyliques peut être augmentée si on favorise le mélange pin-chêne.

Même s'il y a une tendance dans les travaux dégageant un effet positif du mélange en zone méditerranéenne, la relation entre la composition des peuplements et leur biodiversité est loin d'avoir été explicitée en raison du grand nombre de variables mises en jeu (histoire du peuplement, composition, facteurs stationnels, etc.).

La question de la résistance et de la résilience au feu

Comme pour les risques sanitaires, les forêts mélangées sont-elles aussi moins vulnérables au risque d'incendie et plus résilientes, c'est-à-dire capables de se reconstituer à l'identique ?

La question se pose particulièrement pour les peuplements mélangés résineux-feuillus.

En effet les résineux sont plus inflammables que les feuillus en raison de leur contenu en résines et huiles essentielles (BOND et VAN WILGEN, 1996). On peut alors s'attendre à des incendies plus fréquents et à des dommages par le feu plus importants dans les peuplements résineux que dans les peuplements feuillus et à des situations intermédiaires dans les peuplements mixtes. En fait, cette affirmation mérite d'être fortement nuancée. Tout d'abord certains peuplements résineux montrent une inflammabilité moindre que des peuplements feuillus et une assez bonne résistance au feu. Ainsi, au Portugal, SILVA *et al.* (2009) en classant la susceptibilité au feu de plusieurs types de peuplements montrent que les résineux forment à la fois les peuplements les plus vulnérables lorsqu'il s'agit du Pin maritime, mais aussi les moins vulnérables pour le Pin pignon, les feuillus étant classés entre ces deux extrêmes. La structure a également une influence considérable sur la susceptibilité au feu des peuplements et peut contredire l'effet de la composition. Des paramètres structuraux comme la hauteur, la maturité et le degré d'ouverture des peuplements sont par exemple plus utiles pour sérier la vulnérabilité des peuplements que leur composition seule (FERNANDES 2009).

On peut également supposer que la résilience des peuplements mélangés pin/feuillus est supérieure à celle des peuplements purs de résineux ou de feuillus. Là encore, l'exemple du mélange Pin d'Alep avec les chênes méditerranéens tend à démontrer le contraire. Ainsi en Catalogne, BRONCANO *et al.* (2005) étudiant le devenir de peuplements de Pin d'Alep et de Chêne vert dans le Nord-Est de l'Espagne après incendie montrent que ce sont les peuplements purs de pin et purs de chêne les plus résilients : environ près de 2/3 des peuplements monospécifiques se reconstituent à l'identique. Par contre les peuplements mixtes pin/chêne sont moins résilients : seul 1/3 donne à nouveau des peuplements mélangés, alors qu'1/3 évolue vers des pinèdes pures et 1/3 vers des chênaies pures.

Ce constat est partagé par RODRIGO *et al.* (2004) qui ont étudié la reconstitution de peuplements en Catalogne plusieurs années après un grand feu dans trois zones totalisant plus 33 000 ha. Les essences concernées étaient des chênes : Chêne vert, Chêne-liège ou du Chêne *cerrioides* (un chêne espagnol à feuilles caduques) et des pins : Pin d'Alep,

Pin noir, Pin sylvestre du Pin pignon. Les résultats (Cf. Fig. 2) ont montré que les peuplements purs de Pin d'Alep ou de chênes étaient fortement résilients grâce à la banque de graines que les premiers peuvent constituer dans la canopée et à la capacité qu'ont les seconds à rejeter de souche. Par contre les peuplements mélangés n'étaient que peu résilients : les peuplements Pin d'Alep-chênes évoluant plutôt vers des pinèdes pures et les peuplements Pin noir ou Pin sylvestre en mélange avec des chênes vers des peuplements purs de chêne, ou secondairement vers des peuplements mélangés de chênes. Seuls les peuplements de chênes mélangés se reconstituaient pour l'essentiel à l'identique.

Le mélange est-il alors sans intérêt pour la résilience après feu ? Non, car dans cette étude les peuplements mixtes de pin sans adaptation particulière au feu (Pin noir ou Pin sylvestre par exemple) évoluaient pour presque la moitié d'entre eux vers des formations ouvertes. Le mélange prend donc tout son intérêt quand il associe une espèce adaptée au feu (un pin sérotineux ou un chêne méditerranéen) à une espèce qui ne montre pas de stratégie particulière de régénération face au feu, car le mélange évite alors la perte de l'état forestier.

Créer le mélange lorsqu'il est absent : quelques illustrations pour le système pin d'Alep-chêne

Les pinèdes à Pin d'Alep sont pour la plupart issues d'une colonisation spontanée de terres autrefois mises en valeur par des usages pastoraux ou agricoles. La dynamique de succession se poursuit ensuite avec l'installation du chêne qui infiltre progressivement les pinèdes et conduit vers une chênaie. Cependant, l'installation du chêne peut être longue et aléatoire car elle dépend de nombreux facteurs en particulier la disponibilité et la proximité des sources de semences. Lorsque le mélange ne se fait pas naturellement ou à un rythme trop lent, le gestionnaire peut anticiper le processus dynamique et créer le mélange. Nous donnons quelques illustrations pour l'installation du chêne (Chêne vert et/ou Chêne blanc)

à partir de quelques stades de la dynamique : peuplements de pin âgés qu'il faut régénérer, futaies de pin, ou milieu ouvert encore non colonisé par la forêt.

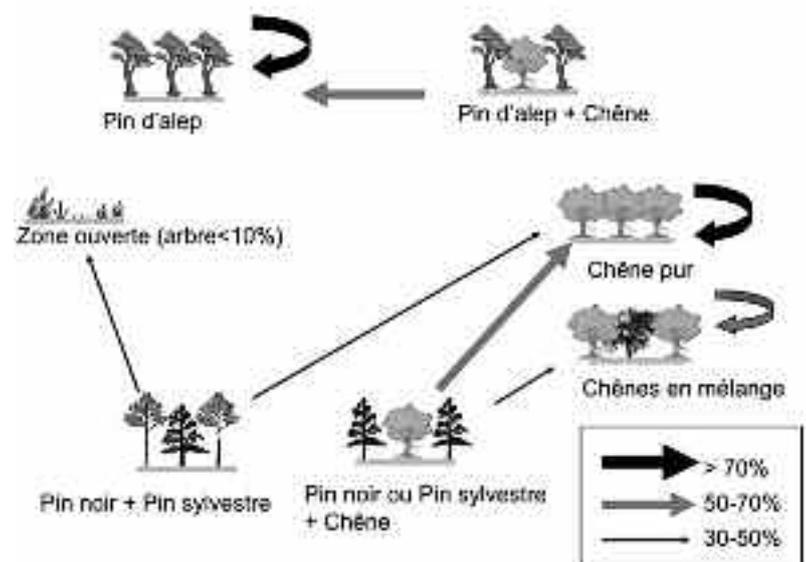
Régénération des pinèdes et installation de chênes

La phase de régénération des peuplements vieillissants de pin est une étape clé dans la vie du peuplement, mais c'est souvent une opération délicate. En effet, la régénération nécessite la conjonction de nombreux facteurs : une disponibilité suffisante en semences, un sol réceptif, des conditions climatiques favorisant l'émergence des semis et ne pénalisant pas leur survie. Ces conditions sont souvent difficiles à réunir simultanément, en particulier en zone méditerranéenne. Un obstacle souvent majeur dans la régénération de certains peuplements est l'absence de sol nu et la présence d'une végétation au sol compétitrice qui empêchent l'installation des semis.

La phase de régénération est aussi l'occasion pour le gestionnaire de moduler la composition du futur peuplement en introduisant par exemple des feuillus lorsque ceux-ci sont naturellement peu nombreux.

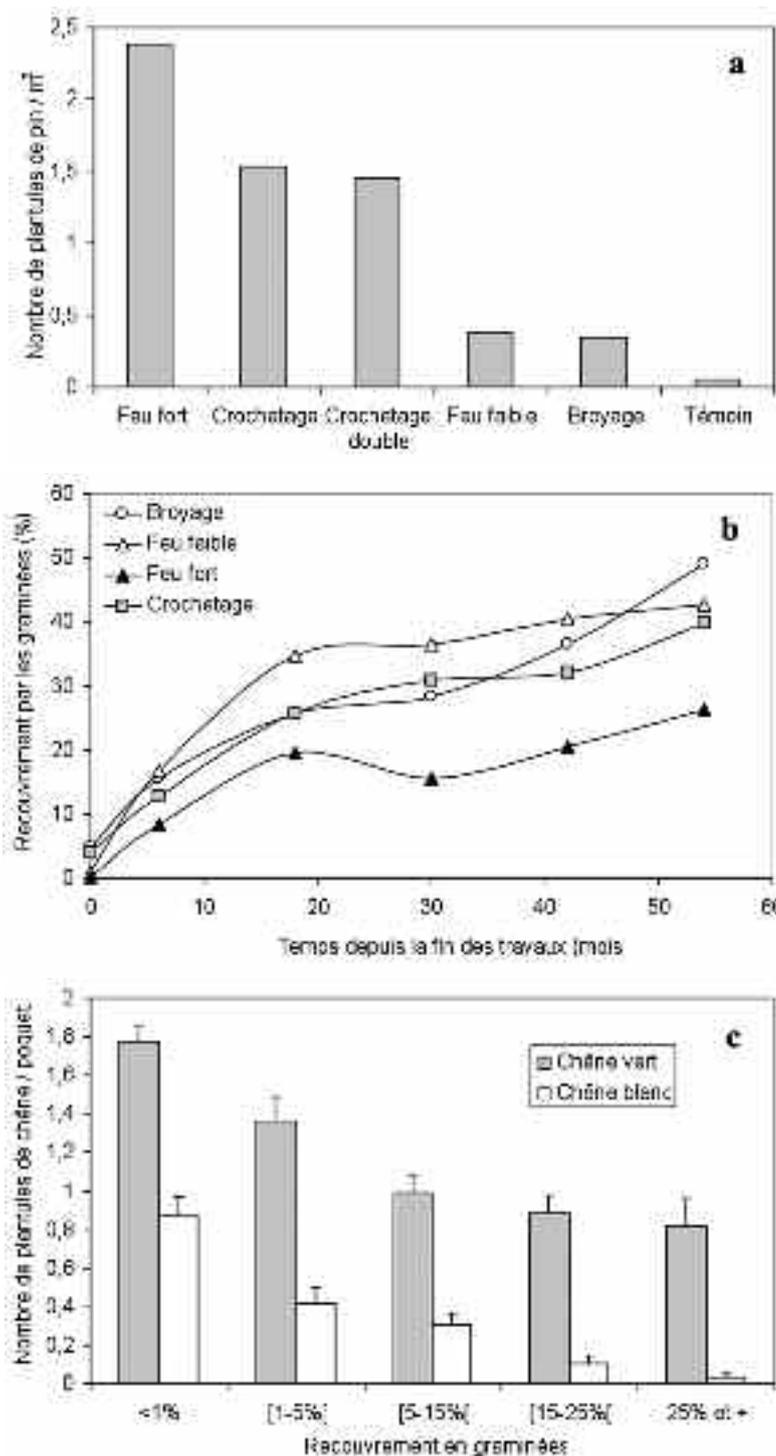
Dans une expérimentation située dans une pinède âgée près de Barbentane (Bouches-du-Rhône) nous avons cherché à la fois à régénérer la pinède à l'aide de travaux du sol et de la végétation et à introduire un mélange avec des feuillus par des semis de glands de Chêne vert et de Chêne blanc. Les

Fig. 2 : Principales transitions entre les peuplements après feu (d'après Rodrigo et al., 2004, modifié)



travaux du sol consistaient en un broyage, un broyage suivi d'un crochetage simple ou double (selon deux directions perpendiculaires), un brûlage dirigé de faible intensité ou de forte intensité et d'un témoin (PRÉVOSTO *et al.*, 2009). Les semis de glands ont été effectués sous forme de 800 poquets de trois glands, la moitié des poquets étant constitués par du Chêne blanc et l'autre moitié par du Chêne vert, mis en place sur deux années consécutives (PRÉVOSTO *et al.*, 2010).

Fig. 3 :
 a) Impact des travaux sur la régénération de pin au bout de 5 années,
 b) sur la couverture en graminées
 c) influence des graminées sur la survie des plantules de chêne



Les résultats ont montré que les travaux ont été indispensables pour permettre l'installation des plantules de pin et de chêne car il n'y a eu en effet que très peu d'installation de semis dans le témoin (Cf. Fig. 3a pour l'exemple du pin). Les travaux ont en revanche montré une efficacité très contrastée : l'installation a été forte dans le brûlage dirigé intense et les crochetages, mais faible dans le brûlage dirigé de faible intensité et dans le broyage. Pour une large partie, l'efficacité des traitements s'expliquaient par leur capacité à créer du sol nu et à réduire la végétation compétitrice au sol constituée par du *Brachypode rameux* (Cf. Fig. 3b). La couverture par les graminées s'est avérée être un facteur décisif pour la survie des plantules (Cf. Fig. 3c pour l'exemple du chêne).

Coupe d'abri et semis de chênes

Lorsque les peuplements sont plus jeunes et que l'installation des chênes est faible, il est possible d'anticiper le processus de la dynamique de succession en pratiquant des éclaircies dans les peuplements et en introduisant les chênes en sous-étage. La strate supérieure des pins constituent un « abri » qui est plus ou moins dense en fonction de l'intensité de la coupe qui a été pratiquée. Un dispositif a été mis en place près de l'Etang-de-Berre sur la Commune de Saint-Mitre-les-Remparts (13) dans des pinèdes pures à Pin d'Alep. Il se compose de 12 peuplements éclaircis selon trois modalités (Cf. Photos 1) : aucune éclaircie (surface terrière de 30 m²/ha), éclaircie moyenne (surface terrière de 20 m²/ha) ou éclaircie forte (surface terrière de 10 m²/ha). Des semis de glands ont été effectués il y a trois ans en introduisant dans chaque peuplement 52 potets de trois glands de Chêne vert et 52 potets de Chêne blanc.

Les résultats montrent que la croissance initiale des chênes au bout de 2 années est la plus forte dans les couverts les plus légers (éclaircie forte) et la plus faible dans les couverts sombres (témoin). Cependant, des mesures d'humidité révèlent en période estivale, que la teneur en eau du sol entre 30 et 50 cm est plus faible dans les peuplements fortement éclaircis que dans les autres traitements. En effet, les peuplements ouverts présentent d'une part une température plus élevée au sol conduisant à une évaporation plus intense et d'autre part permettent un

plus fort développement de la végétation au sol elle-même consommatrice d'eau. Cette accentuation relative du déficit hydrique en période sèche dans les peuplements ouverts n'a pas obéré la croissance des plants sans doute en raison d'années pluvieuses durant l'expérimentation. Cependant, il n'est pas exclu que dans les prochaines années, surtout en cas de sécheresse, le développement des chênes soit pénalisé dans ce type de traitement. Les couverts intermédiaires (éclaircie moyenne) peuvent alors représenter une solution de compromis en permettant à la fois une croissance soutenue et en limitant le déficit hydrique.

Le rôle d'un couvert modéré de Pin d'Alep sur l'installation de feuillus a également été mis en évidence par GOMEZ-APARICIO *et al.* (2009) dans le sud de l'Espagne. Les auteurs ont ainsi montré dans des plantations de pin que les densités moyennes (500-1000 pins/ha) étaient les plus favorables à la régénération d'un grand nombre de feuillus, les chênes en particulier. A l'inverse il y avait moins de régénération dans les zones ouvertes ou dans les peuplements denses (>1500 pins/ha). L'abri léger constitue ainsi un milieu favorable pour l'installation naturelle des feuillus puis pour leur développement en offrant à la fois des conditions de luminosité suffisantes et en atténuant les contraintes climatiques.

Plantation, enrichissement de zones ouvertes

Les plantations de chênes dans les milieux ouverts sont souvent problématiques en zone méditerranéenne en raison de la dureté des conditions climatiques et de la compétition pour les ressources exercée par la végétation concurrente. De plus, une forme indésirable en « pommier » des plants (perte de la dominance apicale) lors de leur développement en plein découvert est souvent observée.

Afin de pallier ces inconvénients, une méthode consiste à planter les feuillus avec un accompagnement ligneux. L'accompagnement est souvent constitué par une



Photos 1 :

Peuplements de Pin d'Alep selon différentes intensités d'éclaircie :
aucune éclaircie, surface terrière de 30 m²/ha (haut),
éclaircie moyenne, 20 m²/ha (milieu)
et éclaircie forte, 10 m²/ha (bas)

espèce qui est tolérée par l'espèce cible, c'est-à-dire qui ne soit pas trop compétitrice mais dont le développement soit suffisamment rapide pour limiter la pousse de la végétation adventice au sol et « gagner » le plant afin d'améliorer sa forme.

Nous avons testé cette technique en installant des plants de chêne vert soit à découvert soit avec un accompagnement de pin d'Alep. L'expérimentation est encore trop jeune pour conclure, mais les premières observations montrent que l'accompagnement par le pin



Photos 2 :

Effet de l'accompagnement ligneux du pin sur l'élongation du Chêne vert (ci-contre) et limitation de croissance du Chêne vert par la végétation concurrente en l'absence d'accompagnement (ci-dessous)



favorise l'élongation des chênes et limite la concurrence par la végétation au sol (Cf. Photos 2). La difficulté dans cette technique consiste à trouver la ou les bonnes espèces accompagnatrices et le bon dosage pour que l'accompagnement ne se révèle pas trop compétiteur pour la plante cible.

Dans les zones ouvertes, il est également possible d'exploiter la végétation en place pour installer les plants, celle-ci jouant le rôle de végétation « nurse ». De nombreuses études ont en effet montré que la végétation arbustive en particulier facilitait le développement des plants introduits à leur proximité. Cet effet pouvait être attribué à plusieurs facteurs dont l'atténuation des facteurs climatiques (vent, température), la réduction de la luminosité, la présence d'un sol localement plus riche et moins compact. Dans une étude conduite dans la Sierra Nevada (Espagne) GOMEZ-APARICIO *et al.* (2004) ont testé sur une vaste échelle l'impact des arbustes en introduisant 18 000 plants de 11 espèces sous 16 types de plantes arbustives « nurses » sur plusieurs années. Les résultats de ces expérimentations ont montré :

- un effet bénéfique de l'abri fourni par le buisson sur la survie et la croissance des plants introduits,

- l'effet positif de l'abri était plus marqué dans les expositions chaudes (basse altitude, pente ensoleillée) et pendant les années sèches,

- les plants résineux introduits n'ont que faiblement bénéficié de la présence du buisson contrairement aux feuillus,

- les buissons n'ont pas tous agi de la même façon, certains étant plus facilitateurs (par exemple les légumineuses, le thym, le romarin) alors que d'autres ont eu un effet plutôt négatif (les Cistes sans doute à cause de leurs propriétés allélopathiques).

Cette étude, ainsi que d'autres conduites sur le même thème, amènent à reconsidérer le rôle de la végétation arbustive lors d'opérations de plantation en zone découverte : le ligneux déjà installé pouvant se comporter comme un auxiliaire précieux favorisant la survie du plant introduit. Il reste cependant à étudier dans quelles mesures ces techniques sont transposables dans le contexte de la forêt méditerranéenne française (Cf. Photos 3 sur une expérimentation en cours) en prenant en compte les spécificités des végétations qui s'y développent.

Conclusion : un bilan positif mais des interrogations encore présentes

Les forêts mélangées semblent donc présenter plusieurs avantages. Certains sont bien établis comme le suggère la corrélation entre le mélange et la productivité, ou entre le mélange et la résistance aux attaques de pathogènes. D'autres sont à nuancer tels que le lien entre forêts mélangées et résistance ou résilience au feu. Enfin certains restent à établir par exemple pour démontrer que le mélange est favorable à la biodiversité en précisant pour quelles composantes de la biodiversité et dans quelles conditions. Malgré les interrogations qui demeurent, l'obtention d'un mélange est une option souvent recherchée par le gestionnaire qui cherche à diversifier sa production et surtout à atténuer et mieux répartir les risques qui peuvent survenir dans la vie du peuplement. Un panel de solutions existe en région méditerranéenne pour créer un mélange entre pins et chênes : il peut s'agir de techniques lourdes (travaux, plantation en plein) ou plus légères (enrichissement, pratique du semis). L'utilisation de la végétation en place, qu'elle soit arborée ou arbustive, est une piste intéressante qui nécessite d'être mieux étudiée en précisant par exemple le degré d'ouverture des peuplements de pin optimal pour la régénération feuillue au sol ou le type de buisson utilisé pour offrir un abri optimal au plant introduit en plein découvert.

Enfin, certaines interrogations restent entières dans la gestion des peuplements mélangés. Celle-ci doit en effet faire coexister des espèces avec des âges d'exploitabilité, des vitesses de croissance, des exigences écologiques qui peuvent être contrastés. Des scénarios sylvicoles permettant de prendre en compte ces spécificités restent donc à élaborer. La modélisation des peuplements mixtes à l'échelle de l'arbre permettra certainement de proposer quelques pistes de gestion dans l'avenir.

B.P., C.R.

Photos 3 :

Expérimentation sur l'enrichissement de zones ouvertes (en haut) en utilisant les buissons comme abri pour les plants (ci-contre, le plant est indiqué par la flèche)

Bibliographie

- Barbier S., Gosselin F., Balandier P., 2008. Influence of tree species on understory vegetation diversity and mechanisms involved. A critical review for temperate and boreal forests. *For. Ecol. Manage.*, 254 : 1-15.
- Bond W.J., Van Wilgen B.W., 1996. Why and how do ecosystems burn? Fire and plants, Chapman & Hall, London, pp. 17-33.
- Broncano M.J., Retana J., Rodrigo A., 2005. Predicting the recovery of *Pinus halepensis* and *Quercus ilex* forests after a large wildfire in northeastern Spain. *Plant Ecol.*, 180 : 47-56.
- Buse J., Levanony T., Timm A., Dayan T., Assmann T., 2010. Saproxylic beetle assemblages in the Mediterranean region: Impact of forest management on richness and structure. *For. Ecol. Manage.*, 259 : 1376-1384.

Bernard PRÉVOSTO
Christian RIPERT
Cemagref
Ecosystèmes méditerranéens et risques
3275 Route Cézanne
CS 40061
13612 Aix-en-Provence cedex 5
Mél : bernard.prevosto@cemagref.fr



Remerciements

Les expérimentations présentées dans cette étude ont bénéficié du soutien financier de la Région Provence-Alpes-Côte d'Azur, du ministère de l'Agriculture (MAP-DGPAAT) et du ministère de l'Ecologie (MEEDDAT-DEB)

- Díaz L., 2006. Influences of forest type and forest structure on bird communities in oak and pine woodlands in Spain. *For. Ecol. Manage.*, 223 : 54-65.
- Fernandes P.M., 2009. Combining forest structure and fuel modelling to classify fire hazard in Portugal. *Ann. For. Sci.*, 66 : 415
- Ginsberg P., 2006. Restoring biodiversity to pine afforestations in Israel. *J Nat Conserv.*, 14 : 207-216.
- Gómez-Aparicio L., Zamora R., Gómez J.M., Hódar J.A., Castro J., Baraza E., 2004. Applying plant facilitation to forest restoration: a meta analysis of the use of shrubs as nurse plants. *Ecol. Appl.*, 14 : 1128-1138.
- Gómez-Aparicio L., Zavala M.A., Bonet F.J., Zamora R., 2009. Are pine plantations valid tools for restoring Mediterranean forests? An assessment along abiotic and biotic gradients. *Ecol. Appl.*, 19 : 2124-2141.
- Hector, A. *et al.* 1999. Plant diversity and productivity experiments in European grasslands. *Science* 286 : 1123-1127.
- Jactel H., Brockerhoff E., 2007. Tree diversity reduces herbivory by forest insects. *Ecol. Letters*, 9 : 835-848.
- Jactel H., Brockerhoff E., Piou D., 2008. Le risque sanitaire dans les forêts mélangées. *Rev. For. Fr.*, LX(2) : 168-180.
- Maestre F.T., Cortina J., 2004. Are *Pinus halepensis* plantations useful as a restoration tool in semiarid Mediterranean areas? *For. Ecol. Manage.*, 198: 303-317.
- Montès N., Maestre F.T., Ballini C., Baldy V., Gauquelin T., Planquette M., Greff S., Dupouyet S., Perret J.B., 2008. On the relative importance of the effects of selection and complementarity as drivers of diversity-productivity relationships in Mediterranean shrublands. *Oikos* 117 : 1345-1350.
- Morneau F., Duprez C., Hervé J.C., 2008. Les forêts mélangées en France métropolitaine. Caractérisation à partir des résultats de l'Inventaire Forestier National. *Rev. For. Fr.*, LX(2) : 107-120.
- Prévosto B., Ripert C., Monnier Y., Martin W., N'Diaye A., Estève R., 2010. Installer des semis de chênes dans les pinèdes à pin d'Alep en phase de renouvellement. *For. Médit.*, XXXI(1) : 25-30.
- Prévosto B., Ripert C., Favand G., Lopez J.M., Estève R., Martin W., N'Diaye A., 2009. Régénération du pin d'Alep en Basse Provence. Impacts des traitements du sol, de la végétation et des rémanents. *For. Médit.*, XXX(1) : 3-10.
- Rodrigo A., Retana J., Picó F.X., 2004. Direct regeneration is not the only response of Mediterranean forests to large fires. *Ecology* 85 : 716-729.
- Silva JS., Moreira F., Vaz P., Catry F., Godinho-Ferreira P., 2009. Assessing the relative proneness of different forest types in Portugal. *Plant Biosystems*, 143 : 597-608.
- Troumbis, A. Y. and Memtsas, D. 2000. Observational evidence that diversity may increase productivity in Mediterranean shrublands. *Oecologia*, 125 : 101-108.
- Tilman D, Reich PB, Knops J, Wedin D, Mielke T, Lehman C, 2001. Diversity and productivity in a long-term grassland experiment. *Science*, 5543 : 843-845.

Résumé

Les forêts mélangées sont devenues un enjeu majeur de la gestion forestière pour les nombreux avantages qu'on leur attribue. Plusieurs travaux montrent que la productivité des formations végétales mélangées est supérieure à celle des formations pures et cela semble être le cas pour les formations forestières. Les forêts mélangées sont moins sensibles aux attaques par les ravageurs en particulier pour les insectes. Elles semblent héberger une biodiversité plus forte mais les travaux ne sont encore que peu nombreux et partiels. Le mélange des essences permet d'obtenir une meilleure résilience face aux perturbations anthropiques en particulier l'incendie. Cependant cette résilience n'est pas systématique et c'est surtout l'adaptation des essences au feu qui est déterminante. En zone méditerranéenne le mélange pin-chêne est le plus fréquent. Des exemples de création de ce type de mélange sont présentés dans diverses situations : i) lors de la régénération des pinèdes avec introduction de semis de chênes, ii) lors de coupes d'éclaircie de différentes intensités et introduction de chênes, iii) à partir de plantation sur des zones ouvertes.

Summary

Mixed forests in the Mediterranean region: what are the advantages and how to foster the mix?
Mixed forests have become a major challenge in forestry management due to the numerous advantages that are attributed to them. Several studies have shown that the productivity of mixed plant formations is higher than that of pure formations and this seems to hold for forests. Mixed forests are less prone to attacks from harmful animal species, in particular from insects. They also appear to harbour greater biodiversity though studies have as yet been too few and limited in scope. A mixture of species enhances resilience to man-made disturbances, especially to wildfire. However, such resistance is not systematic and the determining factor, above all, is the adaptation of tree species to fire. Around the Mediterranean Rim, a mix of pine and oak is the most common. Examples of the creation of this kind of mix are presented for various situations: i) when pine stands are regenerated, with the introduction of seeded oak; ii) at the time of thinning stands, with different degrees of culling and the introduction of oak; iii) planting in open areas.

Changements climatiques et gestion forestière en Aquitaine

Interrogations et recherches de réponses concrètes via le programme d'expérimentation CLIMAQ

par Cécile MARIS

La région Aquitaine a été particulièrement touchée par des événements climatiques majeurs, augmentant les aléas qui pèsent sur la forêt.

Il nous a semblé intéressant de voir comment une autre région se prépare et s'organise face aux risques, en intégrant dès aujourd'hui la préoccupation du changement climatique dans sa gestion forestière.

L'Aquitaine a connu des événements climatiques de grandes ampleurs aux conséquences majeures sur les peuplements forestiers : tempêtes de 1999 et 2009 ; sécheresses de 2004, 2005 ; problèmes sanitaires et dépérissements associés à ces événements.

Dès 2008, faisant suite à ces constats, les forestiers d'Aquitaine s'organisent. Les forestiers aquitains lancent ainsi le programme Climaq (Adaptation des forêts d'Aquitaine aux changements climatiques) qui réunit l'INRA, le CRPF, le FCBA, la CAFSA (Cf. encadré, page suivante). Il a débuté fin 2008 et s'achèvera fin 2011.

Le programme a été évidemment très perturbé par les conséquences de l'ouragan Klaus survenu le 24 janvier 2009. Néanmoins, les différents acteurs de la recherche et du développement ont continué à mettre en place les expérimentations prévues.

Il faut en effet, plus que jamais, reconstituer le tissu forestier endommagé sans oublier d'anticiper sur les problèmes à venir.

Le programme s'appuie sur un budget de 2,1 millions d'euros et comprend trois axes de travail essentiels :

- l'analyse de peuplements existants et le test d'essences et de provenances susceptibles d'intérêt dans le cadre du changement climatique en Aquitaine ;

Les partenaires de CLIMAQ

CAFSA, Coopération

Coopérative Agricole et Forestière Sud Atlantique <http://www.cafsa.fr>

CRPF d'Aquitaine, Développement forestier

Centre Régional de la Propriété Forestière <http://www.crpfaquitaine.fr>

DRAAF Aquitaine, Administration

Direction Régionale de l'Alimentation, de l'Agriculture et de la Forêt
<http://draaf.aquitaine.agriculture.gouv.fr>

ETF d'Aquitaine, Fédération des entrepreneurs

Entrepreneurs de Travaux Forestiers d'Aquitaine <http://www.etf-aquitaine.org>

FCBA, Recherche

Institut Technologique Forêt Cellulose Bois-construction Ameublement
<http://www.fcba.fr>

INRA, Recherche

Institut National de la Recherche Agronomique www.bordeaux-aquitaine.inra.fr

La coordination de Climaq est assurée par le CRPF d'Aquitaine.

Le Comité de pilotage du projet est élargi à l'Office national des forêts et à l'Institut pour le développement forestier.

Les financeurs :

La région Aquitaine <http://aquitaine.fr>

Le Fonds Européen de Développement Régional <http://www.europe.gouv.fr>

Le ministère de l'Agriculture (DRAAF)

– le pré-développement et la mise en place de références concernant les peuplements à vocation énergétique (analyse économique et environnementale) ;

– le transfert de connaissances sur l'adaptation des forêts d'Aquitaine vers les gestionnaires, les sylviculteurs, les décideurs et le grand public.

Quels changements climatiques pour l'Aquitaine ?

Le programme Climaq est né des différentes projections concernant les changements climatiques en Aquitaine et les conséquences de ces changements sur les peuplements forestiers.

– Des températures plus élevées ? Les prévisions d'écart de température entre la fin du XX^e et la fin du XXI^e siècle vont de 0 à + 5°C (Météo-France, 2007).

– Des précipitations plus fortes en hiver ? Comme toute la façade atlantique, l'Aquitaine devrait bénéficier d'une augmen-

tation des précipitations en hiver (Météo-France).

– Des canicules plus fréquentes en été ? Le nombre de jours par an avec températures maximales supérieures à 35°C, pourrait atteindre 50 jours en Aquitaine, selon le scénario A2, le plus marqué (Météo-France, 2007).

– Des événements climatiques extrêmes plus nombreux ? Sur ce point, la recherche ne semble pas encore avoir une position très tranchée. Certains disent ne pas pouvoir affirmer une augmentation de l'intensité et du nombre global de tempêtes, orages ou épisodes de grêle en France ; d'autres tiennent la position inverse.

Les dernières décennies en Aquitaine nous obligent cependant, sans tomber dans le catastrophisme, à nous préparer à d'autres événements climatiques de grandes ampleurs.

– Des conséquences sur les peuplements forestiers (Carbofor) avec une évolution de l'aire potentielle des essences et une modification du cycle des ravageurs.

Vers de nouvelles essences ?

Cet axe de travail est divisé en deux actions :

– l'analyse des peuplements existants en Aquitaine,

– l'installation de nouveaux peuplements expérimentaux.

Le recensement et l'analyse des peuplements existants

Ce recensement permet un état des lieux des peuplements forestiers qui semblent présenter un intérêt vis-à-vis du changement climatique (essences particulières notamment).

Cet inventaire, couplé à des mesures et à des relevés pédologiques et botaniques, apportera des informations précieuses et permettra, nous l'espérons, de distinguer les essences de production résistantes à la sécheresse et adaptées à la région Aquitaine.

Les réseaux expérimentaux de l'ensemble des partenaires ont été explorés de manière à sélectionner 350 sites (150 essences).

Chaque site peut contenir plusieurs essences.

Les essences les plus représentées (effectif >200 modalités) sont le douglas, le cryptomère du Japon, le chêne rouge d'Amérique, le mélèze hybride, le merisier, le thuya géant, le pin de Monterey, le pin laricio de Corse, le pin maritime et le pin noir.

A noter également de manière plus anecdotique, la présence d'aulne de Corse, de cèdre de Chypre, de cèdre de l'Atlas, de cèdre de l'Himalaya, du Liban, de nombreux chênes, du cyprès de Leyde, du liquidambar, du mélèze, différents pins exotiques, du sapin de Chine, de Nordmann, du séquoia géant, toujours vert et du tulipier de Virginie.

La campagne de mesures en cours permettra de mieux juger et de quantifier les réussites comme les échecs.

L'installation de nouveaux peuplements expérimentaux

Le programme Climaq permet la mise en place de deux sortes de parcelles d'expérimentation :

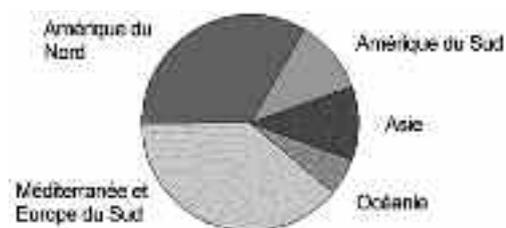
- des tests d'élimination : ce sont des parcelles de tests scientifiques qui permettent de comparer des essences et des provenances sur un même site (dans des conditions stationnelles homogènes). Sur un même site, chaque essence ou provenance est représentée plusieurs fois de manière à gommer l'effet variabilité du sol (répétition) ;

- des parcelles de démonstration : elles visent à comparer des essences choisies en fonction de leur bon potentiel d'adaptation dans chaque massif¹. Elles sont plus simples à installer que les tests d'élimination puisqu'il n'y a pas de répétition sur un même site.

Les tests d'élimination

Il s'agit d'installer des peuplements constitués d'essences productives d'origines diverses (en particulier méditerranéennes, nord et sud américaines voire asiatiques) dont la principale faculté est la résistance à la sécheresse estivale.

L'installation de six sites de tests est prévue dans Climaq. Cinq sites ont été sélectionnés, un site doit encore être trouvé en Adour Pyrénées (Complémentarité avec le réseau REINFFORCE qui prévoit l'installation de quatre essais en Aquitaine).



1 - La forêt d'Aquitaine est divisée en trois massifs aux caractéristiques bien distinctes : le massif landais, le massif Adour Pyrénées et le massif Dordogne-Garonne.

Fig. 1 (ci-contre) :
Zones d'origine des semences testées

Tab. I (ci-dessous) :
Liste des essences testées

Essences	Provenances
<i>Ailanthus altissima</i>	Hongrie
<i>Abies bornmulleriana</i>	France
<i>Acer cappadocicum</i>	Angleterre
<i>Acer pseudoplatanus</i>	Espagne
<i>Cedrus atlantica</i>	France
<i>Cedrus libani</i>	Turquie, Liban
<i>Celtis australis</i>	France
<i>Cryptomeria japonica</i>	Inde, Chine
<i>Cuninghamia lanceolata</i>	Chine (2 provenances)
<i>Cupressocyparis leylandii</i>	?
<i>Cupressus arizonica</i>	Etats-Unis (2 provenances)
<i>Eucalyptus nitens</i> , <i>E. gundal</i>	Nouvelle Zélande, Australie
<i>Fagus orientalis</i>	Turquie
<i>Gleditsia triacanthos</i>	Bulgarie
<i>Juniperus virginiana</i>	Etats-Unis
<i>Nothofagus obliqua</i>	Chili
<i>Nothofagus macrocarpa</i>	Chili
<i>Ostrya carpinifolia</i>	Slovénie, Italie
<i>Pawlonia tomentosa</i>	Hongrie
<i>Pinus brutia</i>	Turquie
<i>Pinus cembra</i>	Mexique
<i>Pinus coulteri</i>	Etats-Unis
<i>Pinus echinata</i>	Etats-Unis (2 provenances)
<i>Pinus elliotti</i>	Etats-Unis
<i>Pinus massoniana</i>	Chine
<i>Pinus montezumae</i>	Mexique
<i>Pinus patula</i>	Mexique, Inde
<i>Pinus pinaster</i>	Mimizan
<i>Pinus radiata</i>	Nouvelle Zélande, Etats-Unis
<i>Pinus resinosa</i>	Etats-Unis
<i>Platanus orientalis</i>	Italie
<i>Quercus faginea</i>	Espagne
<i>Quercus nigra</i>	Etats-Unis
<i>Quercus phellos</i>	Etats-Unis
<i>Quercus robur</i>	France
<i>Quercus rubra</i>	France
<i>Quercus shumardii</i>	Etats-Unis
<i>Quercus velutina</i>	Etats-Unis
<i>Robinia pseudoacacia</i>	Slovaquie
<i>Sequoia sempervirens</i>	Etats-Unis
<i>Tilia americana</i>	Etats-Unis

70% des semences nécessaires à l'installation de ces tests d'élimination ont actuellement été rassemblées. Il nous manque encore un certain nombre de lots de semence (notamment *Pinus* et *Tsuga*). Les sources de production ont été trouvées mais les procédures sanitaires lourdes, surtout lorsqu'il s'agit de faire traverser des frontières aux semences, ralentissent les échanges. Les différents lots de graines seront élevés par le producteur de plants Robin avant d'être installés dans les parcelles à l'automne 2011 ou hiver 2012 (Cf. Fig. 1).

Les parcelles de démonstration

Il s'agit d'installer, dans chacun des trois massifs forestiers aquitains, des dispositifs pédagogiques de comparaison de 19 espèces² sélectionnées en fonction de leur adaptation potentielle aux changements climatiques.

Contrairement aux tests d'élimination décrits ci-dessus, les essences du réseau de démonstration sont déjà présentes en Aquitaine, bien que minoritaires, et ces essences montrent des capacités déjà connues.

Au début de l'année 2011, sept sites ont été installés (Cf. Fig. 2, les dispositifs pédagogiques apparaissent en blanc).

Les objectifs sont sensiblement revus à la baisse. Il sera en effet difficile d'installer les deux sites manquant en Adour-Pyrénées :

– d'une part, nous avons des difficultés pour trouver des sites adaptés dans cette zone (relief, morcellement des propriétés ; hétérogénéité des stations) ;

– d'autre part, la nécessité de protection contre le gibier, au moins pour les feuillus, et les premiers regarnis notamment à Uza (arrachage de tous les plants résineux par des corbeaux) ne nous permettent pas d'assumer financièrement l'installation des deux derniers sites prévus.

L'expérimentation de nouvelles provenances de Pin taeda³

CLIMAQ donne une place particulière au Pin taeda. En effet, ce pin est un pin d'origine américaine qui couvre toute la façade Est des Etats-Unis. Dans son aire d'origine, il se développe dans des milieux très divers et dans des conditions climatiques variées : climat chaud et humide en Floride, climat

continental très sec au Texas et climat tempéré froid en Virginie, proche des conditions climatiques rencontrées en Aquitaine. En France, tous les plants produits dans les pépinières commerciales étaient jusqu'en 2007 issus de graines améliorées importées de vergers à graines des Etats-Unis. De façon à garantir une bonne résistance au froid, une seule origine, la provenance américaine DELMARVA (Delaware, Maryland et Virginie), a été utilisée dans les pépinières commerciales (France). Depuis 2007, compte tenu des mesures prises par la Communauté européenne (décision 2007/233/CE de la Commission du 18 juin 2007) pour limiter le risque d'introduction de *Giberella circinata* (forme sexuée de *Fusarium circinatum*) champignon pathogène des pins et douglas, en Aquitaine, les importations de graines de pin taeda des Etats-Unis ont été suspendues. Les productions de plants en pépinières commerciales devront donc maintenant être effectuées à partir de productions locales de graines issues de peuplements classés ou issues de sources garantissant une sécurité totale au niveau phytosanitaire.

Cette action du programme CLIMAQ conduite par FCBA et associant l'INRA et la CAFSA vise deux objectifs :

1- Constituer une plantation conservatoire des meilleurs clones sélectionnés dans les tests de provenances et de descendances installés en France par FCBA depuis 1987, en vue, premièrement, de l'établissement de vergers à graines de clones commerciaux et, deuxièmement, du développement d'un programme d'amélioration génétique pour la production d'une variété de pin taeda adaptée aux conditions climatiques et édaphiques du Sud-Ouest de la France.

2- Tester des lots de graines récoltées en France sur ces clones et d'autres origines génétiques sélectionnées dans différentes provenances plus tolérantes à la sécheresse. L'évaluation des performances portera à la fois sur la résistance au froid au stade juvénile et sur la résistance en conditions plus sèches (plantations en landes sèches).

Pour l'objectif 1, deux campagnes de greffage des clones sélectionnés ont été effectuées en 2010 et 2011. Les greffons sont prélevés en février, placés en chambre froide, puis greffés en mai sur des porte-greffes (semis de 2 ans) en plein champs. Une plantation conservatoire sera installée sur le site de l'INRA à Pierroton en 2011.

2 - Pour la liste des essences,

voir le *ClimaQInfo* n°1 de mars 2010, ou le site du CRPF d'Aquitaine : www.crpfaquitaine.fr

3 - Le programme Taeda, comme l'ensemble des actions Climaq, a été conçu et initié avant la Tempête KLAUS. Celle-ci a démontré, une fois de plus, la bonne résistance de cette espèce au vent, mais aussi sa sensibilité particulière aux scolytes. Il a néanmoins été décidé de continuer le travail expérimental sur cette essence.

Pour l'objectif 2, des lots de graines ont été récoltés sur les clones sélectionnés et sur d'autres origines génétiques issues de provenances plus tolérantes à la sécheresse (Oklahoma, Arkansas, Piémont appalachiens).

Un premier site a été installé en 2009 par FCBA en landes sèches à Préchac à proximité d'un test de descendances de pin maritime « Lande x Corse » et « Lande x Maroc ». L'objectif de cet essai est d'évaluer en conditions sèches les performances de diverses origines de pin taeda. L'essai comprend 24 descendances récoltées sur les tests génétiques FCBA, 10 descendances américaines de vergers à graines de 2^e génération (*Virginia Department of Forestry*) et 7 lots « commerciaux » récoltés sur peuplements sélectionnés en France. Un deuxième site de même type sera installé fin 2011 par L'INRA.

Les tests pour la résistance au froid seront effectués par FCBA à l'automne 2011 par chocs thermiques, en chambre climatique spécialisée.

Le bois, une source d'énergie renouvelable

Les peuplements forestiers à but énergétique interagissent avec les changements climatiques de trois manières :

- en contribuant à la diversification des itinéraires sylvicoles, ils permettent au massif forestier de mieux résister aux risques liés aux changements climatiques (tempêtes, sécheresses...);
- en permettant de réduire les rotations et donc de limiter les risques à l'échelle du peuplement ;
- le développement de l'utilisation du bois comme source d'énergie renouvelable permet de réduire les émissions de CO₂ dans l'atmosphère et contribue ainsi à réduire les conséquences des activités humaines sur le climat.

Pour ces raisons, les partenaires du projet Climaq se donnent comme objectif d'accompagner l'installation de peuplements forestiers dédiés à la production de bois énergie (plaquettes forestières pour les chaudières collectives et l'industrie notamment).

L'Axe 2 de Climaq s'articule autour de quatre actions.

Le test de différents schémas d'installation

L'objectif est de tester plusieurs itinéraires de sylviculture à but énergétique.

Les essences testées sont les suivantes : peuplier, eucalyptus, robinier, pin maritime, sequoia sempervirens en peuplements dédiés⁴ et semi-dédiés⁴.

Cette tâche rencontre des difficultés. En effet, sur les 17 installations prévues, seules 7 ont été réalisées au début 2011. Parmi celles-ci, on note l'échec des installations en Peuplier (pourtant remplacées). Ceci permet de montrer les difficultés très concrètes que peut rencontrer un sylviculteur : respect des périodes de plantation, adéquation station/essence. Les installations se poursuivront durant la saison 2011/2012, voire 2012/2013.

L'installation de peuplements bois énergie « grandeur nature »

L'objectif d'accompagner les sylviculteurs qui souhaitent dès aujourd'hui installer des peuplements à but énergétique sur leur propriété s'est concrétisé durant la campagne 2009/2010 par l'installation (CAFSA) de :

- 2 200 ha de peuplements semi-dédiés au bois énergie (dont 2 000 ha ont bénéficié d'une aide directe du Conseil régional aux propriétaires) ;
- 450 ha de peuplements dédiés au bois énergie (TTCR⁵ de robinier en grande partie).

Pour permettre d'accompagner les sylviculteurs dans la démarche bois énergie, une note concernant la contractualisation devrait bientôt être proposée.

L'évaluation des peuplements

On manque aujourd'hui de connaissances concernant les peuplements sylvicoles dédiés à la production bois énergie. Un premier bilan économique et environnemental est prévu à partir des peuplements installés notamment dans le cadre des actions Axe 1 et Axe 2.

4 - Peuplements dédiés : dédiés uniquement à la production de bois énergie.
Peuplements semi-dédiés : ces peuplements ont pour objectif la production de bois destiné à la fabrication d'énergie et de bois d'œuvre destiné à la fabrication de parquet, de lambris, d'éléments de charpente...

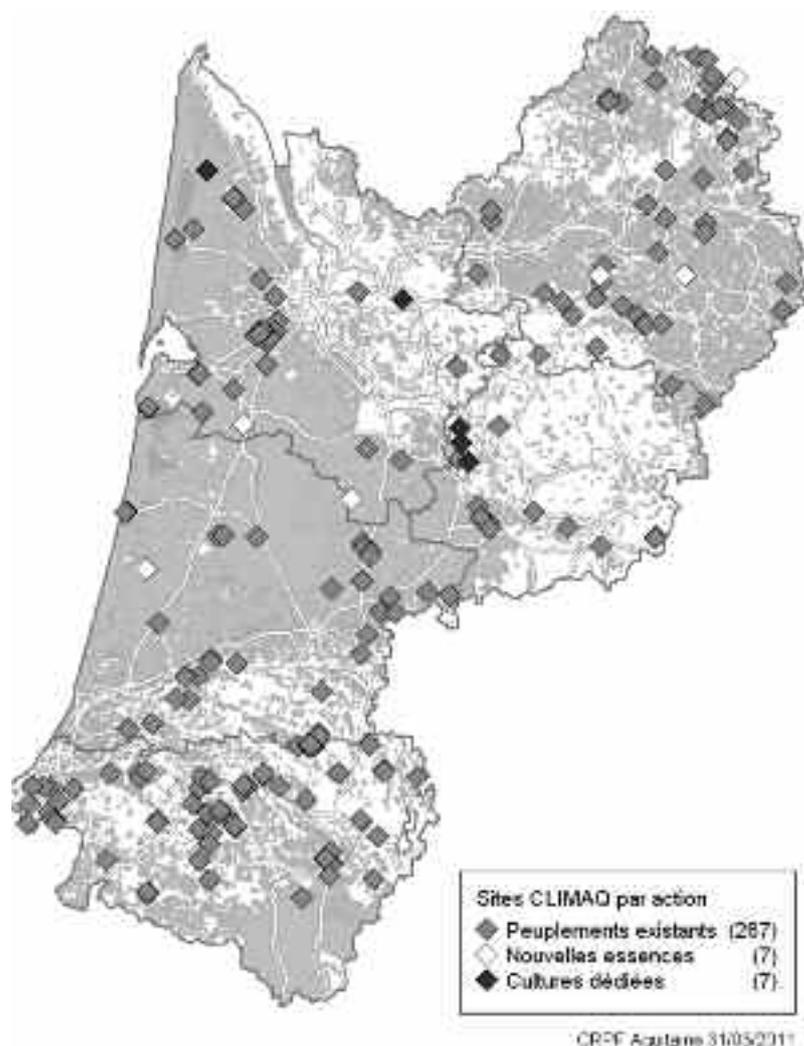
5 - TTCR : Taillis à très courte rotation

Bilan économique

Un cadre méthodologique a été défini pour servir de trame aux analyses économiques. Une application spécifique a été développée pour faciliter la réalisation de simulations économiques « en routine ». Des premières simulations ont été conduites sur eucalyptus, pin maritime et peuplier.

Du fait du manque de données techniques concernant la mise en œuvre des schémas sylvicoles dédiés à l'énergie, les simulations sont réalisées pour un large panel d'hypothèses, notamment en matière de coûts, de recettes et de production biologique. Par conséquent, les résultats de ces simulations devront être complétés par les retours d'expérience du terrain (notamment, les expérimentations mises en place dans le cadre de

Fig. 2 :
Le réseau Climaq,
début 2011,
281 sites référencés



Climaq) qui, en précisant ces hypothèses, permettront d'affiner les performances économiques à attendre.

Bilan environnemental

L'INRA a commencé le descriptif environnemental initial d'un certain nombre de références « bois énergie » de Climaq : Meilhan-sur-Garonne (robinier faux acacia), Saint-Geour-de-Maremme (eucalyptus), Hourtin (Pin maritime).

Il s'agit d'analyse des sols et de relevés floristiques. Les prélèvements pédologiques se poursuivront en avril 2011 avant d'être envoyés pour analyse au laboratoire INRA d'Aras dans le courant du mois de mai 2011.

Ce descriptif initial sera par la suite comparé avec le descriptif à 5 ans.

Parallèlement une étude bibliographique est en cours sur les conséquences de la production de biomasse sur les stations forestières (bilan eau-minéraux-carbone). La synthèse bibliographique concernant le carbone est en cours de relecture et sera publiée avant la fin de l'année 2011. La note bibliographique concernant la production de biomasse et les éléments minéraux majeurs du sol est en cours de rédaction.

La sélection de variétés d'Eucalyptus adaptées à la région

L'eucalyptus est une essence intéressante pour la production de biomasse destinée à la production d'énergie. Plusieurs tentatives d'installation de cette essence dans le massif ont été effectuées par le passé. Elles se sont pour la plupart soldées par des échecs, faute de variétés d'eucalyptus adaptées à notre région (capable notamment de résister au gel).

Pour Climaq, FCBA se charge d'identifier des clones d'eucalyptus adaptés aux conditions pédo-climatiques de l'Aquitaine, à partir des meilleures sources disponibles actuellement.

Cet objectif s'appuie sur :

- la sélection et la multiplication de clones sélectionnés dans les populations existantes ;
- l'amélioration des techniques de multiplication de graines issues de familles performantes de manière à augmenter la quantité

de plants disponibles (par voie végétative ou voie bulk) ;

- l'amélioration des techniques de semis direct en pépinière par enrobage des graines (voie graines) ;

- le test de la résistance des jeunes plants au froid (tests artificiels en chambre climatique) ;

- l'amélioration culturale : sélection de clones à bonne aptitude à l'enracinement, amélioration des connaissances sur la production de plants (conteneur et substrat).

Le transfert de connaissances

Communication auprès des sylviculteurs et des gestionnaires

Suite à la tempête de janvier 2009 la communication concernant Climaq auprès des sylviculteurs et des usagers de la forêt d'Aquitaine a été retardée.

Une campagne de communication sur le programme Climaq est programmée en 2011 dans les différents groupements de propriétaires forestiers d'Aquitaine. La liste des réunions programmées est disponible sur le site du CRPF d'Aquitaine (www.crpf-aquitaine.fr).

Par ailleurs un colloque concernant l'avenir de la forêt d'Aquitaine se tiendra le 25 novembre 2011 à l'Hôtel de Région à Bordeaux. Ce colloque permettra notamment d'aborder la question de l'adaptation des forêts d'Aquitaine aux changements climatiques. Une partie des résultats du programme Climaq sera alors évoquée.

Réseau de démonstration de cultures dédiées au bois énergie

Il s'agit de l'installation d'un réseau de démonstration de culture dédiée au bois énergie avec l'appui financier de la DRAAF (financement de 80% des frais de fourniture des plants). L'objectif est de faciliter le transfert des connaissances acquises. Ce dispositif permet également de tester des itinéraires technico-économiques différents de ceux testés par la CAFSA.

Cette action ciblée initialement sur la seule participation des lycées agricoles et forestiers d'Aquitaine a été ouverte aux propriétaires privés (Etablissement de conventions DRAAF/CRP et CRPF/propriétaire début 2011).

Des projets sont en cours de concrétisation avec la collaboration des lycées forestiers de Bazas et de Sabres, sur des terrains communaux.

Des essais de robinier sont intégrés à ce dispositif à Uza dans les landes et à Audenge en Gironde.

Il reste encore des possibilités d'installation ciblées essentiellement dans le massif landais.

Conclusion

Les résultats du programme Climaq seront utilisables par les sylviculteurs dans quelques années. Le renouvellement des peuplements nécessite d'intégrer dès aujourd'hui la préoccupation du changement climatique dans la gestion sylvicole.

Voici quelques une des pistes proposées :

- raccourcissement des révolutions et adoption d'itinéraires techniques réversibles, afin de tenir compte de l'ensemble des risques, liés ou non au changement climatique (dont tempête, sécheresse, risques phytosanitaires...),

- au sein de chaque propriété, diversification des essences si les stations le permettent, et dans tous les cas, diversification des itinéraires sylvicoles (révolution courte et longue, production de bois énergie, de bois d'industrie et de bois œuvre),

- vigilance, enfin, sur le choix des essences et leur adaptation aux stations (notamment contraintes hydriques) : il s'agit de déconseiller, plus fermement peut-être qu'autrefois, des projets envisagés dans des conditions "limites" de station, considérant que si ces conditions évoluent de manière encore plus défavorables, l'échec est assuré.

Cécile MARIS
CLIMAQ - Adaptation
des forêts aux changements
climatiques
Centre Régional de la
Propriété d'Aquitaine
6, parvis des
Chartrons 33075
Bordeaux Cedex
Tél. : 05 56 01 54 70
Courriel : c.maris@crpf-aquitaine.fr

Résumé

L'Aquitaine a connu des événements climatiques de grandes ampleurs aux conséquences majeures sur les peuplements forestiers : les tempêtes de 1999 et 2009 ont touché essentiellement le massif landais (pin maritime) mais aussi renversé les peuplements de robiniers, de chênes, de peupliers, de hêtres, de pin laricio... et d'autres encore ; les sécheresses de 2004, 2005... ; les problèmes sanitaires associés à ces événements : attaques de scolytes liées à la tempête de 2009 ; le dépérissement des chênes pédonculés, qui serait lié à l'augmentation des sécheresses estivales (études en cours).

Peut-on rattacher ces événements à un changement climatique global de longue durée ? S'agit-il au contraire d'événements ponctuels ? Rien ne nous permet de trancher aujourd'hui. Ce qui est clair en revanche, c'est l'augmentation des aléas qui pèsent sur la forêt.

Dès 2008, faisant suite à ces constats, les forestiers d'Aquitaine s'organisent. La réflexion est également nourrie de résultats de la recherche : programme Carbofor notamment, qui présente les conséquences de plusieurs hypothèses de modification du climat sur les aires de répartition des essences forestières.

Les forestiers aquitains lancent le programme Climaq (Adaptation des forêts d'Aquitaine aux changements climatiques en Aquitaine) qui réunit l'INRA, le CRPF, le FCBA, la CAFSA. Il a débuté fin 2008 et s'achèvera fin 2011.

Climaq a un double objectif :

- une réflexion sur l'utilisation d'essences et de provenances adaptées aux périodes de sécheresse longues et répétées : test d'essences adaptées par l'installation de nouveaux essais comparatifs et bilan de plantations existantes avec des essences supposées mieux résister ;
- une réflexion sur des peuplements à vocation biomasse qui, en permettant des rotations plus courtes, devraient limiter l'impact des aléas climatiques sur les peuplements (ces peuplements ont également l'avantage de produire une source d'énergie renouvelable qui, par effet de substitution ou d'évitement, ralentit le mécanisme du changement climatique).

Ce programme a également l'ambition de communiquer vers les sylviculteurs : à terme propositions concrètes d'adaptation des pratiques sylvicoles aux nouvelles conditions.

Summary

Climate change and forest management in Aquitaine (S.-W. France)

Questions and the search for concrete answers via the CLIMAQ experimentation programme

The Aquitaine region, along France's southern Atlantic coast, has undergone climatic incidents on a major scale with serious consequences for forest stands: storms in 1999 and 2009, affecting in the main the forests in the Landes *département* (maritime pine) but also uprooting stands of acacia, oak, poplar, beach and Corsican pine... and then others: droughts in 2004, 2005... with health problems related to these events: bark beetles and borers linked to the 2009 storm; dying-off of broadleaved oaks which may be related to the increase in summer drought (studies under way).

Can such incidents be linked to global climate change over the long term? Or, on the contrary, are they occasional occurrences? Nothing enables us to decide for sure today. Even so, what is clear is that the number of hazards that threaten forests is rising.

As of 2008, following on such realisations, the foresters of Aquitaine got organised. Their reflection was sustained by the results from research: notably, the CARBOFOR programme which has shown the consequences of several hypotheses about climate change for the distribution patterns of forest tree species.

The foresters of Aquitaine launched the CLIMAQ programme: Adaptation of the forests in Aquitaine to climate change in Aquitaine, involving the INRA (French national agricultural research institute), the CRPF (private forest landowners' association), the FCBA (technological institute), the CAFSA (farm and forestry cooperative). The programme began at the end of 2008 and will finish at the end of 2011.

CLIMAQ has a double objective:

- reflection on the use of species and provenances adapted to long and repeated periods of drought: tests of suitable species by setting up new comparative trials and assessment of existing stands composed of species assumed to be more resistant;
- reflection on stands devoted to biomass production which, by making possible shorter rotations, should limit the impact on stands of climatic hazards (such stands also have the advantage of producing a source of renewable energy which, by fostering substitution or avoidance, puts a brake on the mechanisms of climate change).

This programme also has the goal of communicating with silviculturalists: eventually, concrete proposals for adapting silvicultural practices to the new conditions.

Le climat futur des régions méditerranéennes françaises : quelles tendances ?

par Julien LÉMOND, Christian PAGÉ et Michel DÉQUÉ

Que prédisent les modèles climatiques régionaux ? Lors du colloque de 2007, on nous avait présenté les modèles globaux et les résultats généraux au niveau du bassin méditerranéen. Les méthodes de régionalisation permettent d'affiner encore la résolution spatiale des modèles climatiques. Les premiers résultats disponibles sur la région méditerranéenne sont présentés dans cet article.

Introduction

La région méditerranéenne est une zone écologiquement très sensible. Dans ces territoires qui représentent plus de 10% du PIB mondial, et sont peuplés par 420 millions d'habitants, la pression sur les ressources naturelles est importante, notamment sur l'eau. En effet, une grande majorité de la population du bassin méditerranéen dispose de ressources naturelles renouvelables en eau inférieures à 1000 m³ par an et par personne. Dans cette région sensible, le changement climatique va amplifier la pression sur la disponibilité, l'accessibilité et la demande en eau (HALLEGATE *et al.*, 2008). Les impacts d'une raréfaction de la ressource en eau sont déjà une réalité sur les espaces naturels et forestiers méditerranéens, et les tendances climatiques du siècle prochain risque de les amplifier fortement. Une bonne connaissance des contraintes climatiques futures de cette région est donc nécessaire pour une meilleure compréhension de la dynamique des écosystèmes, et une meilleure adaptation.

Les projections climatiques du GIEC¹ (RANDALL *et al.*, 2007) mettent en évidence une augmentation moyenne annuelle des températures comprise entre 2,2 et 5,1°C d'ici à la fin du siècle, ce qui est supérieur à la moyenne planétaire. Les précipitations devraient probablement diminuer de 4 à 27%. Ces projections permettent de mettre en évidence des tendances globales, mais ne peuvent pas être utilisées pour des

1 - GIEC : Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat

2 - CNRM : Centre national de recherches météorologiques

3 - IPSL : Institut Pierre Simon Laplace - Institut de recherche en sciences de l'environnement

études locales d'impact du changement climatique, qui nécessitent des projections à haute résolution spatiale (comme par exemple les modèles de rendement agricole). L'approche statistique et l'approche dynamique sont les deux grands types de méthodologie permettant d'obtenir une information climatique pertinente pour les études d'impact.

En s'appuyant sur les dernières conclusions du rapport du GIEC, cet article présentera, dans un premier temps, les tendances climatiques sur la Méditerranée à partir des simulations globales. Puis, la deuxième partie sera consacrée à la présentation des méthodes de régionalisation permettant d'obtenir une information climatique à haute résolution. Enfin, des résultats obtenus sur les températures et les précipitations à partir de ces méthodes de régionalisation seront commentés.

Les tendances climatiques globales

Dans cette section les principaux résultats du dernier rapport du GIEC (RANDALL *et al.*, 2007) sont présentés.

Le XX^e siècle

Au cours du XX^e siècle, la température sur l'Europe du Sud et la région méditerranéenne a augmenté d'environ 2°C en moyenne. Durant la période 1980-1990, le réchauffement de la région méditerranéenne a été plus prononcé durant les saisons d'hiver que celles d'été, et plus marqué sur les minimales de température que sur les maximales. Les précipitations ont, quant à elles, diminuées sur le Sud de l'Europe, avec une baisse de 20 % pour certaines régions méditerranéenne.

Les projections pour le XXI^e siècle

A partir des 21 modèles globaux du GIEC, et selon l'hypothèse d'émission A1B (NAKICENOVIC *et al.*, 2000), l'augmentation médiane de la température pour la région méditerranéenne serait de 3.5°C en moyenne annuelle pour la fin du siècle, ce qui correspondrait à une hausse plus marquée que la

moyenne planétaire. Le réchauffement estival serait plus marqué avec une augmentation médiane de 4,1°C pour la région, contre 2,6°C pour la saison hivernale. Suivant les saisons, le réchauffement du bassin méditerranéen sera détectable par rapport à la variabilité naturelle du climat aux horizons 2020-2030.

D'après les projections du GIEC, les précipitations diminueront en moyenne annuelle sur la zone méditerranéenne, avec une diminution médiane de 12% à la fin du siècle. La diminution durant les étés sera plus importante avec une diminution médiane de 24% pour la région, alors que les incertitudes pour les hivers ne permettent pas de dégager de tendances significatives. Cette baisse de précipitations liée au réchauffement climatique devrait se faire sentir vers les horizons 2050-2060, soit plus tardivement que le signal sur les températures.

La régionalisation climatique

Pourquoi régionaliser ?

La première catégorie de modèle numérique utilisé pour étudier l'évolution climatique est celle des Modèles de circulation générale océan atmosphère (MCGOA), ou modèles globaux. Les résultats de ce type d'outil sont, entre autres, utilisés pour l'élaboration des rapports du GIEC (RANDALL *et al.*, 2007). En France, il existe deux modèles de ce type : le modèle ARPEGE développé par le CNRM² à Météo-France (SALAS *et al.*, 2005), et LMDZ développé par les laboratoires de l'IPSL³ (HOUDIN *et al.*, 2006). Les GCM (*Global Climate Model*), très complexes, prennent en compte un maximum de facteurs qui influencent le climat (océan, atmosphère, glace de mer, végétation, fleuves, chimie atmosphérique et cycle du carbone). Ils recouvrent l'ensemble du globe, mais à une faible résolution spatiale (la résolution horizontale de la composante atmosphérique d'un MCGOA fait entre 150 et 350 km de côté). Cette faible résolution spatiale ne permet pas de prendre en compte les processus physiques (comme par exemple la convection qui détermine les précipitations) d'échelle fine, nécessaires à une bonne représentation du climat local. Ces phénomènes physiques, dont la taille est inférieure à la maille du modèle, ne sont donc pas résolus

par les lois de la physique et doivent être paramétrés. La paramétrisation entraîne une représentation imparfaite et donc des biais, en particulier à l'échelle régionale.

D'autre part, elle est incompatible avec les modèles d'impact (hydrologique, agronomique...), qui nécessitent des informations climatiques d'entrée à une résolution spatiale d'une dizaine de kilomètre. Ainsi, pour étudier les impacts du changement climatique qui s'expriment localement, il est nécessaire de disposer de simulations compatibles avec les échelles des modèles d'impact. On appelle régionalisation (ou descente d'échelle), les méthodes qui permettent d'affiner la résolution spatiale des modèles de climat.

Méthodes de régionalisation

Il existe deux grands types de méthodes de régionalisation, qui peuvent être combinées : les méthodes de régionalisation dynamique, et celles de régionalisation statistique.

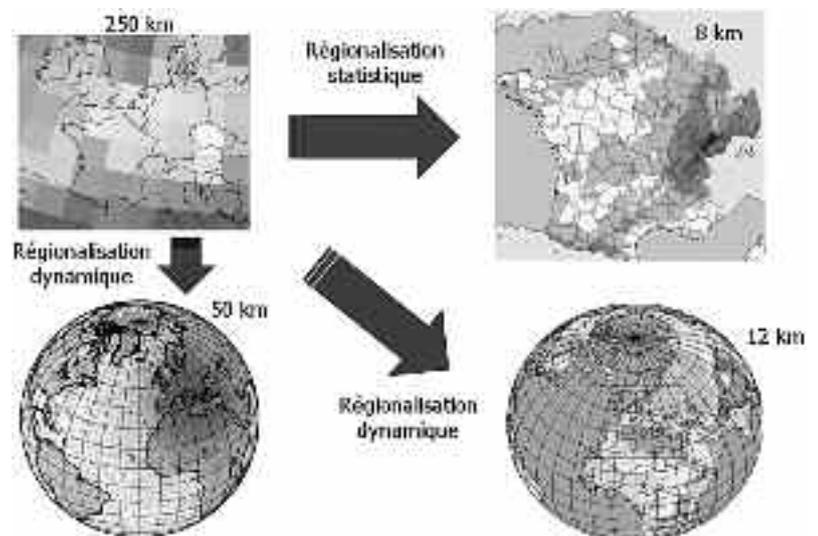
L'approche dynamique repose sur l'utilisation d'un modèle climatique dont la résolution spatiale est plus fine que celle des modèles globaux, ce qui permet de décrire avec plus de précision des phénomènes de petite dimension. Il est possible de distinguer deux familles de descente d'échelle dynamique. La première consiste à augmenter la résolution spatiale d'un modèle global sur une zone d'intérêt, par une méthode de zoom ou d'étirement de la grille (Cf. Fig. 1, bas-gauche). On parle alors de modèle à résolution variable. L'augmentation de la résolution de la grille du modèle global ne s'applique pas à l'ensemble du globe pour des questions évidentes de coût de calcul. Ainsi à l'extérieur de la zone d'intérêt, la résolution de la maille se dégrade progressivement. Les modèles ARPEGE et LMDZ possèdent cette capacité de zoom (e.g. GIBELIN et DÉQUÉ, 2003). Elle permet par exemple au modèle ARPEGE d'obtenir une résolution de 50 km sur le bassin méditerranéen. Cette approche permet de prendre en compte la complexité simulée par un MCGOA, mais également de garder une dynamique atmosphérique cohérente (pas d'effet de bords comme pour les modèles régionaux). En revanche, la résolution peut s'avérer insuffisante pour des modèles d'impact.

La seconde méthode consiste à utiliser un modèle à aire limitée sur la zone étudiée

(Cf. Fig. 1, bas-droit). Ces modèles offrent une haute résolution spatiale (de 10 à 20 km), qui permet une meilleure représentation du climat local (reliefs, contrastes terre-mer, traits de côte complexes). De plus, ils simulent mieux les processus physiques régionaux que les modèles globaux. Mais contrairement à ces derniers, ils sont moins complexes. En effet, ils ne représentent que l'atmosphère et la végétation, tandis que les caractéristiques de l'océan (température de la mer, couverture de glace) sont extraites des modèles globaux. De plus, les conditions aux limites de la zone étudiée doivent être initialisées par des modèles globaux, ce qui est une source importante d'incertitudes (ROWELL, 2006 ; ROWELL *et al.*, 2006). Le modèle régional du CNRM se nomme ALADIN-Climat (BUBNOVA *et al.*, 1995). L'IPSL utilise quant à lui les modèles à aire limitée WRF et MM5 forcés par le modèle atmosphérique LMDZ (CATTIAUX *et al.*, 2009).

Les méthodes de descente d'échelle dynamique offrent l'avantage de bien prendre en compte les processus physiques, mais une correction a posteriori des biais par rapport aux observations est nécessaire. Météo-France utilise par exemple comme observations sur la France métropolitaine, les analyses météorologiques SAFRAN (QUINTANA-SEGUI, 2008), disponibles sur une grille régulière de 8 km. La méthode de correction quantile-quantile (DÉQUÉ, 2007) est alors appliquée à partir de ces données

Fig. 1 : Typologie des principales approches méthodologiques de régionalisation
D'après Pagé



4 - CERFACS : Centre européen de recherche et de formation avancée en calcul scientifique

SAFRAN. Cette méthode corrige l'ensemble de la distribution statistique des simulations, à la fois sur leurs périodes de référence et les projections futures.

La régionalisation statistique consiste à déterminer des relations quantitatives entre les variables atmosphériques de grande échelle, et les variables atmosphériques locales. Le CERFACS⁴, dont les résultats sont présentés ci-dessous, développe dsclim, une méthode basée sur le concept de types de temps (BOË *et al.*, 2009, PAGÉ *et al.*, 2009, BOË *et al.*, 2007). Cette méthode s'appuie sur l'hypothèse que le climat régional dépend à la fois des circulations atmosphériques de grande échelle, et des caractéristiques de fine échelle telles que la topographie ou le type de surface. Chaque régime de temps particulier, caractérisé par une variable de grande échelle (prédicteur), est associé à une distribution spatiale d'une ou plusieurs variables locales (prédicteurs). La méthode utilisée par le CERFACS permet d'obtenir des données à une résolution spatiale de 8 km à partir de sorties de modèles globaux (Cf. Fig. 1 haut-droit).

tion entre grande échelle et petite échelle, ou accentuer des processus physiques actuellement insignifiants. On retrouve cette hypothèse de stationnarité pour l'approche dynamique avec correction quantile-quantile, car les paramétrisations physiques dans les modèles numériques ainsi que les facteurs de corrections de la méthode quantile-quantile utilisent des relations statistiques établies à partir du climat présent.

Les incertitudes

Lorsque des résultats de projections climatiques sont présentés, comme par exemple lors du dernier rapport du GIEC (RANDALL *et al.*, 2007), une enveloppe de probabilité leur est associée. Cette fourchette des possibles représente les incertitudes inhérentes à ces estimations du climat futur. Elle correspond à la dispersion des simulations calculées par l'ensemble des modèles. La connaissance de ces incertitudes est nécessaire pour connaître les limites de leurs utilisations. Il est possible de distinguer quatre catégories d'incertitude (PAGÉ *et al.*, 2008) :

- la première source d'incertitude concerne les scénarios socio-économiques d'émission de gaz à effet de serre. Ces derniers reposent en effet sur des hypothèses difficilement quantifiables, concernant le développement démographique, technologique et la dynamique économique. Il est important de noter que cette incertitude n'est pas significative pour les horizons proches (avant 2050), car les concentrations en gaz à effet de serre pour ces horizons sont surtout associées aux émissions passées et actuelles ;

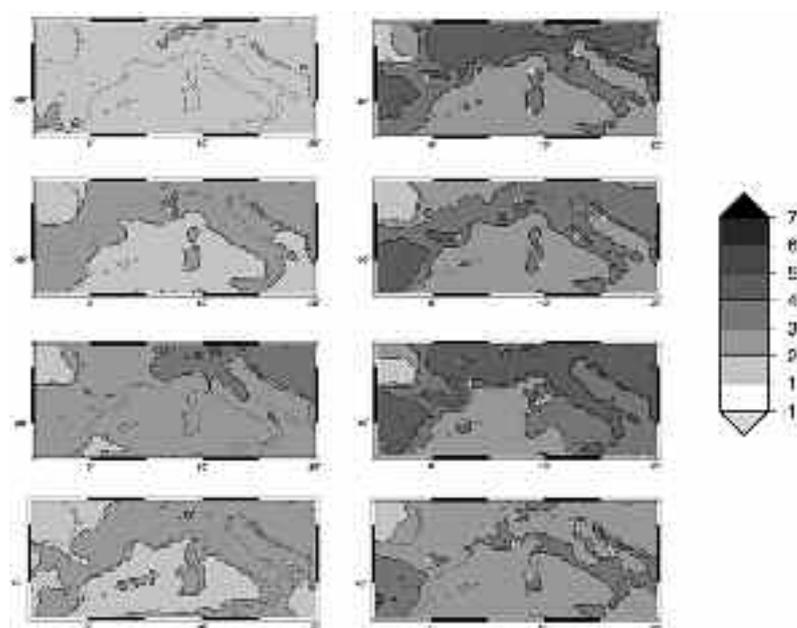
- la deuxième source d'incertitude provient de la représentation relativement approximative des modèles, par rapport à la complexité du système climatique. En effet, la connaissance de certains processus physiques est imparfaite (par exemple ceux liés à la convection ou à certains nuages), tandis que la représentation de certains autres est simplifiée (par exemple la dynamique des calottes de glace) ;

- une troisième source d'incertitude provient de l'aspect chaotique du climat. Ainsi, un modèle initialisé à partir de deux états climatiques très proches peut calculer des projections climatiques significativement différentes ;

- la quatrième source d'incertitude concerne spécifiquement les méthodes de régionalisation. Des différences peuvent en

Fig. 2 :

Anomalies de température (°C) pour les saisons d'hiver (col. gauche) et d'été (col. droite) à l'horizon 2070, calculées par les modèles régionaux du CNRM (ligne 1), du MPI (ligne 2), du MetOffice (ligne 3), de l'ICTP (ligne 4)



effet exister entre deux techniques employées. Ces incertitudes sont liées aux contraintes et hypothèses faites par chaque approche. Les méthodes statistiques ont par exemple besoin de séries d'observation homogènes, utilisent l'hypothèse du caractère gaussien des distributions, ou l'hypothèse de stationnarité.

L'information climatique régionalisée est le résultat d'un processus de production qui associe à chaque étape (choix du scénario d'émission, choix du modèle de climat, choix de la méthode de descente d'échelle) une de ces quatre sources d'incertitude. L'utilisation d'une telle information, par exemple pour initialiser des modèles agronomiques ou hydrologiques, doit donc s'effectuer avec prudence. Elle doit tenir compte du fait que ces projections ne représentent qu'une estimation, et qu'elles sont associées à une barre d'erreur. Il est donc nécessaire d'utiliser plusieurs simulations issues de différents modèles, et de différentes méthodes de régionalisation pour tenir compte de leurs incertitudes associées.

Résultats sur la région méditerranéenne

Cette section présente les résultats des projections climatiques à haute résolution sur la Méditerranée, pour les paramètres de température et de précipitation. Les résultats du CERFACS sont issus d'une régionalisation statistique (PAGÉ, 2009), et ceux du CNRM proviennent du modèle régional Aladin forcé par le MCGA ARPEGE (RADU *et al.*, 2008). Ces dernières ont été produites pour le projet ENSEMBLES (<http://ensemblesrt3.dmi.dk>)

Température

La figure 2 présente les résultats des simulations régionalisées, réalisées par quatre modèles régionaux (CNRM, MPI, MetOffice, ICTP) dans le cadre du projet européen ENSEMBLES. Les résultats sont présentés sur la partie nord-ouest du bassin méditerranéen, sur une grille commune de 25 km de côté. Ils représentent les anomalies de température entre les moyennes saisonnières JJA et DJF de la période 1961-1990 et la période 2060-2080.

Pour les deux saisons d'été et d'hiver, les modèles régionaux mettent en évidence une augmentation de la température dans cette région. L'intensité de l'augmentation est plus marquée durant la saison estivale. Des nuances peuvent toutefois être apportées sur l'estimation quantitative de cette anomalie. En hiver, les anomalies sont comprises en moyenne sur l'ensemble de la région entre +1 et +2°C par le modèle du CNRM, alors qu'elles sont comprises entre 2 et 4°C par celui du MetOffice. Les projections du MPI et de l'ICTP sont quant à elles comprises entre celles du CNRM et celles du MetOffice. On constate également que seuls les modèles du MPI et de l'ICTP, mettent en évidence une différence terre-mer dans l'intensité du réchauffement.

En été, les disparités quantitatives sont moins importantes puisque l'ensemble des modèles estime une anomalie de température comprise entre 2 et 5°C, avec une légère sous estimation pour le modèle de l'ICTP (entre 2 et 4°C). De plus l'ensemble des modèles estime un réchauffement d'intensité différente entre le continent et la mer.

Ce résultat sur l'augmentation de la température à l'horizon 2070 peut donc être considéré comme robuste puisqu'il tient compte de l'incertitude inter-modèle.

Précipitation

Comme pour les températures, les résultats sur les précipitations présentés sur la figure 3 correspondent aux simulations des quatre modèles régionaux du CNRM, du MPI, du MetOffice, et de l'ICTP. Les résultats sont présentés en anomalie de précipitation (en mm/jour) à l'horizon 2070, pour les saisons estivales et hivernales.

De manière globale, les résultats sur les précipitations mettent en évidence une diminution des pluies à l'horizon 2070. Durant les saisons estivales (Cf. Fig. 3, droite), l'ensemble des modèles estime une diminution des précipitations sur les espaces continentaux de l'ordre de -0,3 à -2 mm/jour. La diminution estimée par le modèle de l'ICTP est spatialement moins vaste que celle des autres. L'ensemble des modèles étudiés ne montre pas de modification significative au dessus des espaces maritimes.

En hiver, les incertitudes inter-modèles sont trop importantes pour dégager une tendance significative. En effet, on constate

durant cette saison, qu'aucun modèle ne s'accorde sur le signe de l'anomalie, notamment sur les espaces continentaux. Ainsi, sur le Nord de la zone étudiée, le modèle du CNRM met en évidence une diminution des précipitations, contrairement à ceux du MPI et de l'ICTP. Le modèle du MetOffice estime pour sa part une diminution des précipitations à l'Est de la zone, et une augmentation à l'Ouest.

Cette incertitude inter-modèle souligne la difficulté de modéliser les précipitations. Ces dernières sont associées à des processus physiques encore difficilement représentés dans les modèles. Les résultats de projections sur les précipitations sont donc à utiliser avec encore plus de précautions que ceux sur les températures.

Les résultats de la figure 4 sont ceux obtenus par une méthode de régionalisation statistique développée au CERFACS. Ils représentent, à une résolution horizontale de 8 km sur la France, la différence (exprimée en pourcentage) entre les moyennes saisonnières JJA et DJF des périodes 1961-1990 et 2046-2065. Ces résultats sont cohérents avec ceux obtenus par les modèles régionaux (Cf. Fig. 3). En été, on constate un signal cohérent sur l'ensemble de l'espace étudié de diminution des précipitations. Sur le pourtour méditerranéen, cette baisse est évaluée entre 30 et 40 %. En revanche pour la saison

d'hiver, on constate que le signal n'est pas spatialement homogène. Les projections montrent une diminution des précipitations sur la partie ouest du territoire, alors qu'elles montrent une augmentation sur la partie est, notamment sur le pourtour méditerranéen. Ce signal ressemble fortement à celui obtenu par le modèle régional du MetOffice (Cf. Fig. 3, col. gauche, ligne 3).

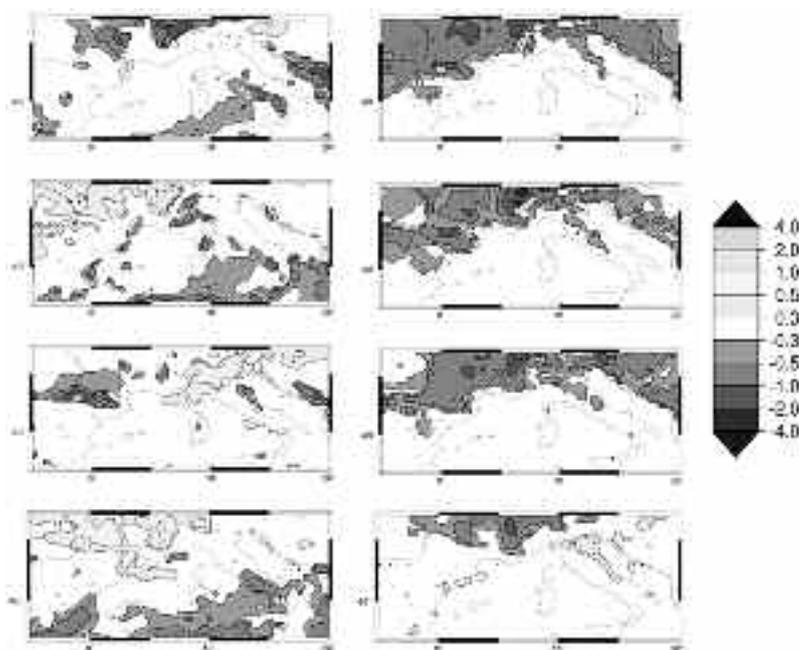
Ainsi les projections régionalisées de précipitations mettent en évidence une diminution significative des précipitations dans la partie nord-ouest du bassin méditerranéen, pour les saisons estivales pour le milieu et la fin du XXI^e siècle. En revanche, il est difficile de mettre en évidence un signal significatif pour les saisons hivernales, puisque les résultats inter-modèles et inter-méthodes ne sont pas convergents.

Conclusion

Les tendances climatiques globales, synthétisées dans le dernier rapport du GIEC (RANDALL *et al.*, 2007), mettent en évidence un réchauffement significatif sur la région méditerranéenne. Toutefois ces tendances doivent être précisées à l'échelle régionale. Des méthodes de régionalisation, ou descente d'échelle, permettent d'obtenir des projections à haute résolution spatiale. Les méthodes statistiques et dynamiques sont les deux types d'approche permettant, d'une part d'analyser plus précisément l'évolution climatique locale, et d'autre part d'initialiser des modèles d'impact. Les résultats de ces simulations régionales présentées dans cet article montrent d'une part que les résultats sont plus robustes sur la température que sur les précipitations, et également durant l'été que durant l'hiver. Ainsi, ces projections régionales montrent durant la saison d'été une augmentation des températures et une diminution des précipitations. Durant l'hiver, les modèles s'accordent sur une augmentation de la température, avec néanmoins des incertitudes sur l'amplitude de cette augmentation. En revanche, l'absence de signal robuste sur les précipitations hivernales ne permet pas de dégager de tendances significatives.

Au CERFACS, des simulations climatiques régionalisées à l'aide d'une méthode statistique, sont disponibles sur la France à

Fig. 3 :
Anomalies de précipitation (mm/jour) pour les saisons d'hiver (col. gauche) et d'été (col. droite) à l'horizon 2070, calculées par les modèles régionaux du CNRM (ligne 1), du MPI (ligne 2), du MetOffice (ligne 3), de l'ICTP (ligne 4)



une résolution spatiale de 8 km (PAGÉ *et al.*, 2009). Au CNRM, l'approche dynamique est employée. Dans le cadre du projet ENSEMBLES, le modèle régional Aladin a été utilisé (RADU *et al.*, 2008). Des simulations du modèle ARPEGE avec une maille décentrée et étirée (GIBELIN et DÉQUÉ, 2003) sur la Méditerranée permettent également d'obtenir des données à haute résolution pour les études régionales. Ces différentes données seront directement accessibles fin 2011, aussi que des simulations régionales de l'IPSL, via le portail d'accès DRIAS (LÉMOND *et al.* 2010).

Les perspectives de régionalisation climatique sont nombreuses. Le CERFACS envisage de régionaliser les simulations de la prochaine expérience de comparaison des modèles globaux CMIP-5, ainsi que les expériences du projet ENSEMBLES. Météo-France est lui impliqué dans le projet de régionalisation dynamique national SCAMPEI et international CORDEX. Ces projets actuels et futurs permettront ainsi de préciser l'évolution climatique de la région Méditerranée.

J.L., C.P., M.D.

Bibliographie

- Boé J., Terray L., Habets F., Martin E., 2006: A simple statistical-dynamical downscaling scheme based on weather types and conditional resampling. *J. Geophys. Res.*, 111, D21106.
- Boé, J., 2007 : Changement global et cycle hydrologique : Une étude de régionalisation sur la France. Thèse de Doctorat, Université Paul Sabatier – Toulouse III, 256 pp
- Bubnova, R., G. Hello, P. Benard and J-F Geleyn, 1995: Integration of the fully elastic equations cast in the hydrostatic pressure terrain-following coordinate in the framework of the ARPEGE/Aladin NWP system. *Mon. Wea. Rev.*, 123, 515-535.
- Cattiaux, J., Vautard, R. and Yiou, P., Origins of the extremely warm European fall of 2006, 2009: *Geophys. Res. Lett.*, doi: 10.1029/2009GL037339.
- Déqué, 2007: Frequency of precipitation and temperature extremes over France in an anthropogenic scenario: model results and statistical correction according to observed values. *Global and Planetary Change*, 57, 16-26.
- Gibelin A.L., Déqué, 2003: Anthropogenic climate change over the Mediterranean region simulated by a global variable resolution model. *Clim Dyn* 20: 327-339.
- Hourdin, F., I. Musat, S. Bony, P. Braconnot, F. Codron, J.-L. Dufresne, L. Fairhead, M.-A. Filiberti, P. Friedlingstein, J.-Y. Grandpeix, G. Krinner, P. Levan, Z.-X. Li, and F. Lott, 2006: The LMDZ4 general circulation model: climate

Julien LÉMOND
 Direction de la
 Climatologie,
 Météo-France
 Toulouse, France
 Auteur
 correspondant :
 julien.lemond@
 meteo.fr

Christian PAGÉ
 SUC au CERFACS,
 URA CERFACS/CNRS
 N°1875, Toulouse,
 France

Michel DÉQUÉ
 CNRM / GAME,
 Météo-France, CNRS,
 Toulouse, France

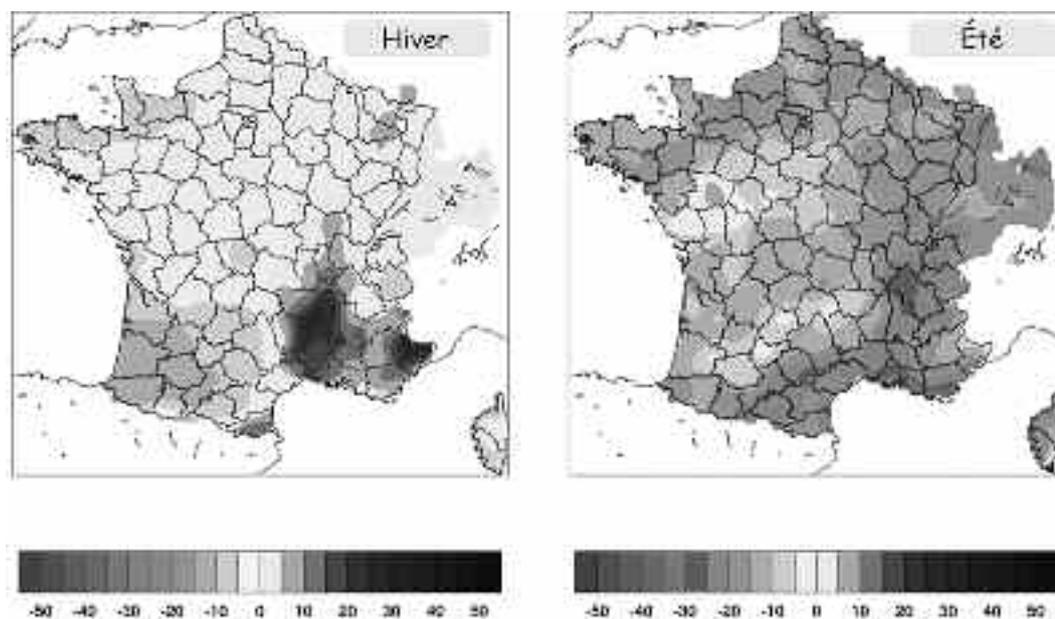


Fig. 4 :
 Anomalies de précipitation (%) pour les saisons d'hiver (col. gauche) et d'été (col. droite) à l'horizon 2050, calculées à partir d'une désagrégation statistique sur les modèles globaux du GIEC. Les cartes représentent la moyenne multi-modèles.

- performance and sensitivity to parametrized physics with emphasis on tropical convection, *Clim Dyn*, 27, 787–813.
- Hallegatte S., Somot S., Nassopoulos H., 2008 : Région Méditerranéenne et Changement Climatique, IPEMED, 63 pages.
- Randall, D.A., Wood, R.A., Bony, S., Colman, R., Fichefet, T., Fyfe, J., Kattsov, V., Pitman, A., Shukla, J., Srinivasan, J., Stouffer, R.J., Sumi, A. and Taylor, K.E.: Climate Models and Their Evaluation, in: Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M., and Miller, H.L. (eds.): *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2007.
- Lémond J., Ph. Dandin, S. Planton, R. Vautard, C. Pagé, J. Cattiaux, M. Déqué, S. Denvi, C. Drevet, L. Franchistéguy, S. Geindre, M. Kerdoncuff, L.Li, J.M. Moisselin, T. Noël, L Terray, 2010: DRIAS project – A step toward French Climate Services, *soumis à Advances in Science and Research*.
- Nakicenovic, N. et al, 2000: Special Report on Emissions Scenarios: A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, U.K., 599 pp
- Pagé, C., L. Terray et J. Boé, 2008: Projections climatiques à échelle fine sur la France pour le 21^e siècle : les scénarii SCRATCH08. *Technical Report TR/CMGC/08/64*, SUC au CERFACS, URA CERFACS/CNRS No1875, Toulouse, France.
- Pagé, C., L. Terray et J. Boé, 2009: dsclim: A software package to downscale climate scenarios at regional scale using a weather-typing based statistical methodology. *Cerfacs Technical Report TR/CMGC/09/21*, SUC au CERFACS, URA CERFACS/CNRS No1875, Toulouse, France.
- Quintana Segui P., Moigne P. L., Durand Y., Martin E., Habets F., Baillon M., Canellas C., Franchistéguy L. et Morel S., 2008: Analysis of Near Surface Atmospheric Variables : Validation of the SAFRAN analysis over France, *J. App. Meteo. Clim.* 47, 92-107
- Rowell D. P. et Jones R. G., 2006: Causes and uncertainty of future summer drying over Europe, *Clim. Dyn.*, 27(2-3), 281–299, doi: 10.1007/s00382–006–0125–9.
- Rowell D. P., 2006 : A demonstration of the uncertainty in projections of UK climate change resulting from regional model formulation, *Clim. Change*, 79(3-4), 243–257, doi :10.1007/s10584–006–9100–z.
- Salas y Mélia D., Chauvin F., Déqué M., Douville H., Guérémy J.F., Marquet P., Planton S., Royer J.F., Tyteca S., 2005: Description and validation of CNRM-CM3 global coupled climate model, *Note de Centre du GMGEC N103*, décembre 2005.
- Radu R., Déqué M., Somot S., 2008: Spectral nudging in a spectral regional climate model, *Tellus*, Vol 60, Issue 5, 898–910, DOI: 10.1111/j.1600-0870.2008.00341.

Résumé

La forte sensibilité climatique de la région méditerranéenne, notamment celle des espaces forestiers, nécessite une meilleure prise en compte des projections climatiques pour le siècle à venir. Pour ce faire, l'information climatique mise à disposition doit être à haute résolution spatiale. D'une part pour prendre en compte de manière plus réaliste que les simulations globales, les contraintes et processus physiques d'échelle fine (liés par exemple aux reliefs, ou aux contrastes terre-mer). Et, d'autre part, pour permettre à certaines communautés (agronomes, hydrologues...) d'alimenter des modèles d'impacts par des variables atmosphériques scalairement cohérentes. Les méthodes de régionalisation (ou descente d'échelle) statistiques et dynamiques sont les deux grandes approches méthodologiques permettant de produire une information climatique régionalisée, allant de 50 à 8 km de résolution horizontale en fonction de la méthode et de la région prise en compte. Les résultats de ces méthodes obtenues par la communauté climatique française (CNRM, Météo-France, CERFACS, IPSL) mettent en évidence pour la fin de siècle une augmentation (diminution) des températures (précipitations) en été. En hiver une incertitude persiste sur l'amplitude du réchauffement, alors qu'aucune tendance sur les précipitations ne se dégage.

Summary

Mediterranean climate in the future: what trends?

The great sensitivity to climate in the Mediterranean region, particularly of forest species, requires that we take into better account climate projections for the coming century. To this end, the climatic information available for use must have high spatial resolution. This is necessary first of all in order to take into account, in a manner more realistic than is possible with global simulations, the constraints and physical processes at a very detailed level (for example, effects linked to relief or to sea-land contrasts). And secondly, to enable certain professions (agronomists, hydrologists...) to provide variable atmospheric data, as input for modelling climatic impact, at a suitably coherent scale. The two main methodological approaches for obtaining climatic information at a regional level (a narrowing-down in scale) are dynamic and statistical and these two make possible a horizontal resolution ranging from 50 km to 8 km depending on the method and the region involved. The results obtained by these two methods by the scientific community working in France (CNRM – meteorological research body, *Météo-France* – national weather forecasters, CERFACS- European Centre for Research and Advanced Training in Scientific Computation, IPSL - research institute) have highlighted for the end of the century an increase in temperatures and a decrease in rainfall in summer. For winter, some doubt remains as to the degree of warming while no clear trend appears for precipitation.

Évolution des surfaces incendiées en fonction des changements météorologiques

par Eric RIGOLOT

Il n'existe pas, en France, aujourd'hui, d'études scientifiques permettant d'établir un lien statistique entre incendies de forêt et changements climatiques. Pourtant lors de saisons météorologiques exceptionnelles, les dispositifs de prévention et de lutte ont montré leur limite. Seule l'Espagne a réalisé une étude rétrospective des statistiques des incendies confrontées aux enregistrements climatiques, qui montre des modifications du régime des incendies déjà à l'œuvre, liées à une augmentation du risque météorologique feu de forêt.

Beaucoup d'études scientifiques portant sur des régions du monde où les incendies de végétation sont fréquents (Amérique du Nord, Australie) annoncent un impact des changements climatiques sur le régime des feux, avec une augmentation de la fréquence et de la gravité des incendies, une augmentation de la durée de la saison à risque et une augmentation de la fréquence des épisodes orageux dans l'hémisphère Nord engendrant plus de feux liés à la foudre (par ex. STOCK *et al.*, 1981 ; WILLIAMS *et al.*, 2001). Plusieurs auteurs démontrent qu'à terme, ce régime de feux plus sévère pourrait avoir un effet plus important sur la végétation que le changement climatique lui-même (par ex. DALE *et al.*, 2001).

Qu'en est-il en Europe et plus particulièrement en France ?

En France les surfaces incendiées sont en baisse depuis 1990 malgré l'augmentation de l'indice de risque feux de forêt (IFM – Indice Forêt Météo) sur la période 1958-2008 (CLOPPET & REGIMBEAU, 2009) et malgré l'augmentation concomitante des surfaces des espaces naturels combustibles. Les effets combinés des dispositifs de prévention et de lutte sont mis en avant pour expliquer ces bons résultats et notamment l'efficacité du traitement des feux naissants. Il n'existe donc pas aujourd'hui de lien statistique entre incendies de forêt et changements climatiques dans notre pays.

Pourtant, lors de saisons météorologiques exceptionnelles comme l'a été la saison 2003, les dispositifs de prévention et de lutte ont montré

leurs limites. Lors de la dernière décennie, les cinq pays européens de la façade méditerranéenne ont tour à tour fait l'expérience de ces conditions extrêmes et de ces grands incendies et même pour certains à plusieurs reprises. Mais très peu d'études scientifiques permettent d'établir que ces événements extrêmes sont liés au changement climatique.

Les seules études actuellement disponibles proviennent d'Espagne. Il y a d'abord l'étude du météorologue Ayala-Carcedo en 2004 qui analyse les données nationales espagnoles sur 30 ans (1971-2000) et qui montre que l'évapo-transpiration potentielle, autrement dit la sécheresse de l'atmosphère, a augmenté de 15% sur la période. Il conclut à une africanisation du climat de l'Espagne continentale. Cette augmentation déjà observée de la composante météorologique du risque incendie de forêt en Espagne, a des conséquences mesurées par d'autres études espagnoles. Il s'agit d'études rétrospectives où les statistiques des incendies (occurrence, surface) sur le siècle passé sont confrontées aux enregistrements climatiques, pour montrer que des modifications du régime des incendies sont déjà à l'œuvre.

PIÑOL *et al* (1998) ont construit deux indices de danger d'incendie à base météorologique pour la Catalogne en utilisant une longue série climatique (1941-1994). Le premier indice est une estimation de l'inflammabilité du combustible fin et mort, tel que le calcule l'ICONA à l'époque, et l'autre indice est dérivé de l'indice français de Pierre Carrega (amélioration de l'estimation de la réserve en eau du sol). Les valeurs estivales moyennes de ces deux indices augmentent sur la période 1941-1994, mais aussi le nombre de jours par été où ces indices marquent des risques très élevés. Jusque-là, on retrouve les tendances de l'étude rétrospective française (CLOPPET & REGIMBEAU, 2009). La nouveauté réside dans la corrélation significative avec les statistiques incendie de Catalogne sur la période 1968-1994 en termes de nombre de feux et de surfaces brûlées.

Toujours en Espagne, PAUSAS (2004) a ensuite montré une augmentation nette du nombre annuel d'incendies et de la surface brûlée dans la région de Valencia sur le siècle passé, qui accompagne une augmentation des températures annuelles et estivales sur la même période de 0,35°C par décennie, ainsi qu'une légère tendance à la baisse des précipitations estivales. En Espagne, une

augmentation du risque météorologique feu de forêt aurait donc amorcé un changement du régime des feux.

ALMAGRO (2009) montre que les grands incendies de forêts (plus de 500 ha) représentent une part toujours plus importante des surfaces annuelles parcourues par les incendies en Espagne. Au cours des deux dernières décennies, se distinguent les grands incendies se déroulant dans des conditions météorologiques extrêmes caractérisées par des températures élevées, des vents forts et une humidité relative de l'air très basse.

Il existe en revanche des études prospectives fondées sur les projections climatiques. Pour la France, l'étude récente menée par l'Office national des forêts (ONF), l'Inventaire forestier national (IFN) et Météo France pour le compte de la Mission interministérielle sur l'extension des zones sensibles aux feux de forêt (CHATRY *et al.*, 2010) estime que les zones à risque d'incendie de végétation qui représentent actuellement le tiers des surfaces de landes et de forêts de métropole devrait augmenter de 30% à l'horizon 2040, pour atteindre la moitié des surfaces forestières à l'échéance 2050 (Cf. détails de l'étude dans l'article de R. Savazzi p. 217).

Dans les régions subissant déjà le risque d'incendie, on peut s'attendre à un allongement de la période critique. Par une approche similaire menée à l'échelle de l'Europe, GIANNAKOPOULOS *et al.* (2005) ont projeté l'IFM canadien pour un scénario avec augmentation de 2°C des températures. A l'échéance 2030 – 2060, une augmentation de 1 à 6 semaines de la période de risque d'incendie est attendue dans les pays du pourtour méditerranéen.

Pour l'ensemble de l'Europe, l'étude récente de THONICKE *et al.* (2010) a modélisé les changements de régime des incendies de forêt sous l'effet des changements du climat et d'usage des sols. Cette étude conclut qu'un climat plus chaud et plus sec va augmenter le risque et la magnitude des incendies et de leurs effets, mais jusqu'à un certain seuil. En effet, pour le scénario le plus sévère (ECHAM-A2, concentration de 840 ppm en CO₂), l'accumulation du combustible va décroître en région méditerranéenne au-delà d'un certain niveau de réchauffement, limitant ainsi les surfaces incendiées. Cette étude confirme en outre à moyen terme l'extension du risque incendie vers le nord et l'est de l'Europe.

Notons enfin, qu'aussi bien les analyses statistiques rétrospectives que les études prospectives peinent à distinguer la part du changement imputable aux changements climatiques et aux changements d'usage des sols ou aux activités de prévention et de lutte contre les incendies.

Concernant les mesures adaptatives, aucune étude spécifique sur la prévention des incendies de forêt n'a été menée à notre connaissance en Europe. En revanche, de nombreuses études ont été menées pour renforcer la résilience des peuplements face aux incendies aggravés par le changement climatique (par ex. VALDECANTOS *et al.*, 2009).

Des mesures strictement sylvicoles recommandent des éclaircies dans la strate dominante pour réduire la biomasse qui transpire. Par exemple GARCIA *et al.* (1999) concluent que ces opérations sylvicoles permettent d'augmenter la disponibilité en eau pour les arbres maintenus, même si REGATO (2008) souligne le besoin de recherche qui subsiste dans ce domaine pour ajuster les recommandations à la diversité des espèces, âges et densité à considérer, y compris en mélange. Dans tous les cas, l'ouverture du milieu contribue à l'augmentation de l'éclaircissement des sous-bois qui peut favoriser le développement des strates basses combustibles. Ces mesures devraient donc s'accompagner nécessairement de débroussailllements associés pour maintenir un niveau de risque acceptable. Dans cet objectif, REGO (2008) recommande de combiner éclaircie et opérations de brûlage dirigé, plusieurs études récentes ayant montré l'intérêt de cette technique pour limiter les émissions de CO₂ produites par les incendies (NARAYAN *et al.*, 2007, DÉFOSSÉ *et al.*, 2010).

E.R.

Références

- Almagro C. (Ed.) 2009. El futuro en llamas : Cambio climático y evolución de los incendios forestales en España. Rapport Greenpeace Espagne. 44p.
- Ayala-Carcedo F.J. 2004. La realidad del Cambio Climático en España y sus principales impactos ecológicos y socioeconómicos. *Industria y Minería*, 10-15.
- Chatry C., Le Gallou J.-Y., Le Quentrec M., Lafitte J.-J., Laurens D., Creuchet B. 2010. Changement climatique et extension des zones sensibles aux feux de forêts. Rapport de la mission interministérielle. 190p.
- Dale V.H., Joyce L.A., McNulty S., Neilson R.P., Ayres M.P., Flannigan M.D., Hanson P.J., Irland L.C., Lugo A.E., Peterson C.J., Simberloff D., Swanson F.J., Stocks B.J., Wotton B.M. 2001. Climate Change and Forest Disturbances. *BioScience*, 51 : 723-734.
- Defossé G., Loguercio G., Oddi F.J., Molina J.C., Kraus P.D. 2010. Potential CO₂ emissions mitigation through forest prescribed burning: A case study in Patagonia, Argentina. *Forest Ecology and Management*.
dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2010.11.021
- Cloppet E., Regimbeau M. 2009. Estimation de l'impact du changement climatique dans le domaine de l'eau et des incendies de forêt. Rapport d'étude final Météo France. 90p.
- Giannakopoulos C., Bindi M., Moriondo M., LeSager P., Tin T. 2005. Climate change impact in the Mediterranean resulting from a 2°C global temperature rise. Rapport préparé pour le WWF. Observatoire National d'Athènes, Grèce.
- Gracia C.A., Sabate S., Martinez JM., Albeza E. 1999. Functional responses to thinning. In *Ecology of Mediterranean Evergreen Oak Forests*, eds. F. Roda, J. Retana, C. Gracia & J. Bellot, 329-338. Heidelberg: Springer-Verlag.
- Narayan C., Fernandes P., van Brusselen J., Schuck A. 2007. Potential for CO₂ emissions mitigation in Europe through prescribed burning in the context of the Kyoto protocol. *Forest Ecol. Manage.* 251(3) : 164-173
- Piñol J., Terradas J., Lloret F. 1998. Climate warming, wildfire hazard, and wildfire occurrence in coastal eastern Spain. *Climatic Change*, 38: 345-357.
- Regato P. 2008. Adaptation au changement global, Les forêts méditerranéennes. Malaga, Espagne, Centre de coopération pour la Méditerranée de l'UICN. Réimprimé (2009). ii+ 254p.
- Rego F. 2008. Forest strategies to prevent risks associated to climate change: The case of Portugal. In : *Compte rendu présenté lors de l'atelier international UICN-WWF "Adaptation au changement climatique dans la gestion et la conservation des forêts méditerranéennes"* Athènes, 2008
- Stocks B.J., Fosberg M.A., Lynham T.J., Mearns L., Wotton B.M., Yang Q., Jin J.Z., Lawrence K., Hartley G.R., Mason J.A., McKenney D.W. 1998. Climate change and forest fire potential in Russia and Canadian boreal forests. *Climatic Change*, 38 : 1-13.
- Thonicke K., Rammig A., Gumpenberger M. 2010. Changes in managed fires and wildfires under climate and land use change and the role of prescribed burning to reduce fire hazard under future climate conditions. Deliverable D4.2-1c / D4.2-4 of the Integrated project "Fire Paradox" Project n°FP6-018505, European Commission, 34p.
- Valdecantos A., Baeza M.J., Vallejo V.R. 2009. Vegetation management for promoting ecosystem resilience in fire-prone mediterranean shrublands. *Rest. Ecol.* 17(3) : 414-421.
- Williams A.A., Kaboly D.J., Tapper N. 2001. The sensitivity of Australian fire danger to climate change. *Climatic Change*, 49 : 171-191.

Eric RIGOLOT
INRA
Écologie des Forêts
Méditerranéennes
(UR629)
Site Agroparc
Domaine Saint Paul
F-84914 Avignon
cedex 9
Mél : eric.rigolot@
avignon.inra.fr

Résumé

Beaucoup d'études scientifiques (notamment en Amérique du Nord et en Australie) annoncent un impact des changements climatiques sur le régime des feux avec une augmentation de la fréquence et de la gravité des incendies, de la durée de la saison à risque et de la fréquence des épisodes orageux dans l'hémisphère Nord engendrant plus de feux liés à la foudre. A terme, ce régime pourrait avoir un effet plus important sur la végétation que le changement climatique lui-même.

En France, grâce à l'effet combiné des dispositifs de prévention et de lutte, les surfaces incendiées sont en baisse depuis 1990 malgré l'augmentation de l'indice de risque feux de forêt et malgré l'augmentation concomitante des surfaces combustibles. Il n'existe donc pas, aujourd'hui de lien statistique entre incendies de forêt et changements climatiques dans notre pays. Pourtant lors de saisons météorologiques exceptionnelles, les dispositifs de prévention et de lutte ont montré leur limite. Très peu d'études scientifiques permettent d'établir que ces événements extrêmes sont liés au changement climatique.

Seule l'Espagne a réalisé une étude rétrospective des statistiques des incendies confrontées aux enregistrements climatiques, qui montre des modifications du régime des incendies déjà à l'œuvre. En Espagne, une augmentation du risque météorologique feu de forêt aurait amorcé un changement du régime des feux.

Il existe en revanche des études prospectives, fondées sur les projections climatiques, une en France et une pour l'ensemble de l'Europe. Cette dernière conclut qu'un climat plus chaud et plus sec va augmenter le risque et la magnitude des incendies et de leurs effets, mais jusqu'à un certain seuil. En effet, pour le scénario le plus sévère, l'accumulation du combustible va décroître au delà d'un certain niveau de réchauffement, limitant ainsi les surfaces incendiées. Cette étude confirme l'extension du risque incendie vers le nord et l'est de l'Europe. Notons enfin, que ces analyses et ces études peinent à distinguer la part du changement imputable aux changements climatiques et aux changements d'usage des sols.

Summary

Evolution of burnt-out areas as a function of meteorological changes

Many scientific studies (notably in North America and in Australia) have given notice of the impact of climate change on the patterns of wildfire, including a rise in the frequency and gravity of wildfire, the length of the high-risk season and the frequency of thunderstorms in the Northern Hemisphere that cause outbreaks linked to lightning. In the long run, such patterns could have a greater effect on vegetation than climate change itself.

In France, thanks to the combined effects of fire prevention and firefighting, the extent of burnt-out areas has fallen since 1990, despite the rise in the forest fire risk index and a concomitant increase in inflammable surface area. Thus, in France at present there exists no statistical link between forest wildfire and climate change. Nevertheless, during exceptional seasonal weather, fire prevention and firefighting facilities have shown their limits. Very few scientific studies have given grounds for establishing a link between such extreme occurrences and climate change.

Only in Spain has a retrospective study of wildfire statistics in the light of climate change been carried out. It has revealed modifications in the pattern of wildfire that are already under way: in Spain the rise in the climate-related risk of forest fires appears to have triggered a change in the pattern of wildfire.

On the other hand, there are studies that have looked into the future, based on projections about climate: one concerns France, the other Europe as whole. This last one concludes that a warmer, drier climate will increase the likelihood and the scale of wildfire as well as its impact, but only to a certain extent. In fact, in the worst-case scenario, the accumulation of inflammable material will slow down when a certain level of warming has been reached, with a consequent limiting of burnt-out areas. This study confirms the extension of the risk of wildfire towards the north and the east of Europe. Finally, it should be noted that these analyses and studies enable us to attribute their share in these modifications to climate change, on the one hand, and changes in land use, on the other.

Riassunto

Evoluzione delle superficie incendiate in funzione dei cambiamenti meteorologici

Molti studi scientifici (particolarmente in America del nord e in Australia) annunciano un impatto dei cambiamenti climatici sul regime dei fuochi con un aumento della frequenza e della gravità degli incendi, della durata della stagione a rischio e della frequenza degli episodi tempestosi nell'emisfero settentrionale generando più fuochi legati al fulmine. A termine, questo regime potrebbe avere un effetto più importante sulla vegetazione del cambiamento climatico se stesso.

In Francia, grazie all'effetto combinato dei dispositivi di prevenzione e di lotta, le superficie incendiate sono in diminuzione dal 1990 malgrado l'aumento dell'indice di rischio fuochi di foresta e malgrado l'aumento concomitante delle superficie combustibili. Non esiste dunque, oggi, un legame statistico tra incendi di foresta e cambiamento climatico nel nostro paese. Pure durante stagioni meteorologiche eccezionali, i dispositivi di prevenzione e di lotta hanno mostrato i loro limiti. Pochissimi studi scientifici permettono di stabilire che questi eventi estremi sono legati al cambiamento climatico.

Sola la Spagna ha realizzato uno studio retrospettivo delle statistiche degli incendi confrontate alle registrazioni climatiche, che mostra modifiche del regime degli incendi già in opera. In Spagna, un aumento del rischio meteorologico fuoco di foresta avrebbe incominciato un cambiamento del regime dei fuochi.

Esiste invece studi prospettivi, fondati su proiezioni climatiche, uno in Francia l'altro per l'insieme dell'Europa. Questo ultimo conclude che un clima più caldo e più secco sta per aumentare il rischio e la magnitudine degli incendi e del loro effetto, ma fino a una certa soglia. Difatti, per lo scenario più severo, l'accumulazione del combustibile sta per decrescere al di là di un certo livello di riscaldamento, limitando così le superficie incendiate. Questo studio conferma l'estensione del rischio incendio verso il nord e l'est dell'Europa. Notiamo finalmente, che queste analisi e questi studi fanno fatica a distinguere la parte del cambiamento imputabile ai cambiamenti climatici e ai cambiamenti dell'uso dei suoli.

Essai de cartographie des massifs potentiellement sensibles aux incendies estivaux à l'horizon 2040

par Yvon DUCHÉ, Rémi SAVAZZI, Loïc COMMAGNAC,
Emmanuel CLOPPET et Mathieu REGIMBEAU

***Cette étude a été réalisée
dans le cadre de la mission
interministérielle sur l'extension
des zones sensibles aux feux
de forêts, qui a rendu
son rapport en 2007.***

***A l'échelle nationale, elle donne
une bonne idée de ce pourrait
être la situation en 2040 :
40% de la surface totale
en espaces naturels non agricoles
seraient sensibles
aux feux estivaux.***

***Ce travail constitue une base
indispensable à la réflexion sur
les politiques à venir.***

Contexte de l'étude

La mission interministérielle sur l'extension des zones sensibles aux feux de forêts a souhaité réaliser une approche cartographique de cette extension, en faisant appel aux compétences de plusieurs organismes nationaux. La présente étude a été menée d'octobre 2009 à mai 2010 conjointement par l'Office national des forêts (ONF), avec la collaboration active de l'Inventaire forestier national (IFN) qui a assuré le travail de cartographie des types de peuplements regroupés, le découpage en massifs forestiers, et le traitement du Modèle numérique de terrain, et Météo-France, qui a effectué l'expertise permettant de définir les zones d'extension d'un climat semblable au climat méditerranéen.

Cette approche est basée sur de nombreuses hypothèses qui restent à préciser et les résultats ne doivent donc pas être considérés comme "la" vérité intangible et incontestable, mais comme un aperçu d'une situation assez plausible.

A partir de l'analyse des incendies passés significatifs hors région méditerranéenne lors de grandes années de sécheresse, et des connaissances empiriques de l'ONF sur les feux majeurs en région méditerranéenne, en particulier dans l'arrière-pays, il est apparu possible d'identifier un certain nombre de formations forestières, présentes au sein de ces secteurs incendiés, et qui ont manifesté une forte sensibilité au feu du fait de leurs conditions stationnelles particulières induisant des teneurs en eau des végétaux faibles au cours des périodes de fortes sécheresses. C'est sur ces trois facteurs (formations forestières, conditions stationnelles et périodes de fortes sécheresse) que portent les hypothèses sur lesquelles se base cette étude.

Hypothèses de modélisation

Le premier élément sur lequel on doit faire des hypothèses est l'effet du changement climatique sur la végétation d'ici 2040. A cet horizon, le changement est trop rapide pour permettre une migration des peuplements forestiers. L'étude se base donc sur les formations en place, dont on peut avoir une approche grâce aux données de l'IFN.

Dans les secteurs affectés par une dégradation des conditions climatiques, certaines formations forestières déjà présentes vont devenir sensibles aux incendies de forêts. Parmi ces formations, celles qui devraient être les premières concernées sont celles qui ont déjà été affectées par des feux de forêts majeurs lors d'années de grande sécheresse, ou en périphérie de la région méditerranéenne. Par analogie, celles qui en sont proches en termes de composition d'essence ou de structure (avec notamment des sous-étages denses et une forte continuité horizontale et verticale) devraient également être concernées.

De nouvelles formations ou essences pourraient devenir sensibles, mais il n'est pas possible en l'état des connaissances de les identifier.

Autre hypothèse importante : seuls les incendies estivaux sont pris en compte. Les incendies estivaux concernent des formations forestières en phase de végétation. Leur sensibilité au feu est fonction de la structure du peuplement, des essences présentes, mais aussi de la teneur en eau des parties fines et vivantes (en majorité), de la litière et des herbacées mortes. Cette sensibilité est donc modélisable en fonction du type de peuplement, de la station (en particulier de ses réserves en eau potentielles), et des conditions climatiques, facteurs eux-mêmes possibles à approcher à l'échelle de l'étude. Les connaissances actuelles trop partielles sur les feux hivernaux, dont la propagation initiale dépend principalement de l'état et de la teneur en eau des végétaux morts (litière, herbacée, morts-bois), mais également de facteurs anthropiques dont on ne peut deviner l'évolution au cours des 30 prochaines années, ne permettent pas de proposer une modélisation fiable de ce phénomène à l'échelle nationale.

La sensibilité potentielle des formations végétales est modélisée sur l'ensemble du territoire en se basant sur l'hypothèse de

conditions climatiques équivalentes à celles rencontrées au cours de la période de référence (1990-2008) dans le moyen pays méditerranéen. Cette sensibilité potentielle ne s'exprimera que dans les zones qui auront à l'horizon 2040 des conditions équivalentes à celles du moyen pays méditerranéen, qui seront estimées à partir des études d'évolution du climat réalisées par Météo-France.

Evaluation de la sensibilité potentielle de la végétation

La méthodologie d'évaluation de la sensibilité potentielle de la végétation aux incendies estivaux est la suivante : classement des divers types de végétation existants en 4 classes de sensibilité potentielle aux incendies, délimitation du territoire en 4 classes de capacité de réserve en eau potentielle des sols, et croisement de ces deux facteurs pour obtenir un indice brut de sensibilité potentielle en 5 classes.

Classement des divers types de végétation existants

Par analogie avec les peuplements connus comme sensibles dans l'arrière-pays méditerranéen et en moyenne montagne et ceux parcourus par les feux historiques lors des grandes années de sécheresse sur tout le territoire national, tous les types de peuplements de l'IFN ont été classés en 4 niveaux de sensibilité potentielle aux incendies estivaux (facteur végétation) :

– sensibilité forte (4) : garrigues et maquis, landes arbustives, peuplements à dominance de chêne vert, chêne-liège (*Quercus ilex* ou *suber*), eucalyptus (*Eucalyptus* sp.) ou de pins autres que montagnards : pins d'Alep, pignon, maritime, noir, laricio, sylvestre (*Pinus halepensis*, *pinia*, *pinaster*, *nigra*, *laricio*, *sylvestris*) ;

– sensibilité assez forte (3) : landes herbacées, inculte ou friche, peuplement à dominance de chêne pubescent (*Quercus pubescens*) ou châtaignier (*Castanea sativa*) ;

– sensibilité modérée (2) : peuplements à dominance de résineux hors pins cités précédemment : sapins (*Abies* sp.), épicéa (*Picea abies*), douglas (*Pseudotsuga menziesii*), pin à crochet, pin cembro (*Pinus uncinata*, *cem-*

bra), mélèze (*Larix decidua*), cèdre (*Cedrus* sp.)...

– sensibilité faible (1) : peuplements à dominance de feuillus hors ceux cités précédemment : hêtre (*Fagus sylvatica*), chêne sessile, chêne pédonculé, chêne rouge (*Quercus petraea*, *robur*, *rubra*), charme (*Carpinus betulus*), frênes (*Fraxinus* sp.), robinier (*Robinia pseudoacacia*...)

La catégorie “autre” au sens de l'IFN (qui regroupe tout ce qui n'est pas ou peu naturel comme les secteurs fortement anthropisés, les cultures, les zones minérales ou aquatiques...), ainsi que les peupleraies, pelouses, landes de montagne et espaces verts urbains sont considérés comme ayant une sensibilité très faible à nulle et sont donc sortis du champ de l'étude (sensibilité potentielle ou modélisée égale à 0 quel que soit le facteur sol ou l'évolution des conditions climatiques).

L'IFN a apporté son expertise pour améliorer la classification des types de feuillus ou conifères indifférenciés, et des types de peuplement en mélange, par analyse de la base de données placettes et définition des aires de répartition des essences forestières.

Ainsi, les types de peuplements mélangés ont pu être classés en fonction de l'essence la plus représentative.

Pour les types de feuillus indifférenciés, il a été fait le choix de rechercher la probabilité de présence du chêne pubescent et de son cortège. Dans les régions forestières où il est présent d'une façon statistiquement significative, les peuplements de feuillus indifférenciés ont été considérés comme ayant une probabilité importante d'être à base de chêne pubescent et ont donc été affectés d'un facteur végétation de 3, tandis que dans les autres régions forestières ils ont été affectés d'un facteur végétation de 1. Le même travail aurait pu être réalisé pour le châtaignier, mais il est apparu dans l'étude que ce dernier pouvait être présent de façon significative presque partout en France, de façon plus ou moins mélangée, et que sa probabilité de présence n'était pas un facteur discriminant pour la sensibilité des types de feuillus indifférenciés.

Pour les types de conifères indifférenciés, le travail de discrimination s'est fait sur la base de l'aire de répartition de la hêtraie-sapinière et des peuplements à base de sapin, d'épicéa et de douglas (aire définie par régions forestières sur la base d'analyses statistiques de la base placettes et d'expertise).

Dans les régions forestières retenues comme faisant partie de cette aire de répartition, les peuplements de conifères indifférenciés ont été considérés comme ayant une forte probabilité d'être composés d'une de ces essences et ont donc été affectés d'un facteur végétation de 2. Dans les autres régions forestières, il a été considéré que les peuplements de conifères indifférenciés correspondaient soit très probablement à des peuplements à base de pin, soit de façon moins probable, mais néanmoins non négligeable, à des peuplements à base des essences précitées en dehors de leur aire naturelle de répartition donc dans des conditions moins favorables à leur développement les rendant d'une part plus sensibles à la sécheresse et au dépérissement et, d'autre part, moins concurrentielles vis-à-vis du sous-étage, et donc en faisant des formations plus sensibles à l'incendie. Dans les deux cas, ces peuplements ont été affectés d'un facteur végétation de 4.

Pour tenir compte du fait qu'un même type de peuplement au sens de l'IFN pouvait avoir des faciès différents impliquant une sensibilité différente en fonction de l'altitude, la note de sensibilité a été pondérée à la baisse dans les zones à caractère montagnard identifiées par l'IFN : la zone biogéographique “montagne” de l'IFN (par opposition à “plaines et collines” et “méditerranée”) a été redécoupée entre “moyenne montagne” et “montagne” en fonction d'un seuil d'altitude de 1000 m, et le facteur végétation diminué respectivement d'une et deux classes dans ces zones.

Cartographie simplifiée de la capacité potentielle de réserve en eau

Cette capacité potentielle de réserve en eau des sols est fonction du sol (pédologie simplifiée), de la pente, et de l'exposition.

Pour la pédologie, la base de données utilisée est la carte européenne des sols au 1/1000000^e éditée par le Centre commun de recherche de la Commission européenne qui donne des grands secteurs où un type de sol (selon classification WRB) est prédominant. De par sa faible précision, son utilisation pour des croisements de couches n'est pas recommandée à l'échelle d'un massif mais est possible à l'échelle de l'étude. Même si des cartes pédologiques plus précises exis-

tent sur certains secteurs, c'est la seule carte disponible couvrant de façon homogène l'ensemble du territoire.

Les différents types de sols recensés ont été affectés d'une note caractérisant leur capacité à retenir l'eau (facteur sol) :

- les sols liés aux cours d'eau (fluvisols) ont une bonne réserve en eau et ont donc été affectés d'un facteur sol de 1 ;

- les sols peu épais (lithosols, regosols), très pauvres (podzols) ou très filtrants (arenosols) sont considérés comme ayant une mauvaise réserve en eau notamment en été et sont affectés d'un facteur sol de 3 ;

- certains sols très pierreux (rankers, rendzines) ou calcaires (cambisols calcaires et calciques) peuvent avoir une mauvaise réserve en eau dans des conditions de pente forte (pentes supérieures à 50%) ou dans un secteur à faible pluviométrie et fort dessèchement comme en région méditerranéenne (zone biogéographique "méditerranée" de l'IFN). Ces sols ont été également affectés d'un facteur sol de 3 ;

- tous les autres types de sols (y compris les rankers, rendzines et cambisols calcaires et calciques dans des pentes inférieures à 50% et hors région méditerranéenne) sont considérés comme ayant une réserve en eau neutre et sont affectés d'un facteur sol de 2.

La carte des pentes a été calculée à partir du Modèle numérique de terrain de l'IGN au pas de 50m et a été utilisée de deux façons : les pentes supérieures à 50% ont été retenues comme pentes fortes pour le calcul du facteur sol, et pour les calculs d'exposition, les pentes inférieures à 30% ont été assimilées à des secteurs plats.

Le calcul d'exposition (également réalisé à partir du MNT de l'IGN) donne une valeur d'exposition même pour les pentes très faibles. Il a donc été choisi de reclasser tout ce qui était en pente inférieure à 30% dans la même catégorie que le plat.

Trois situations ont été retenues et affectées d'une note caractérisant leur influence sur la réserve en eau (facteur exposition) :

- les situations les plus ensoleillées (grand secteur sud entre sud-est et ouest) sont considérées comme plus favorables à l'assèchement et sont affectées d'un facteur exposition de 3 ;

- les situations les plus ombragées (grand secteur nord entre ouest-nord-ouest et est-nord-est) sont considérées comme plus favo-

rables à la conservation de l'eau et sont affectées d'un facteur exposition de 1 ;

- les situations intermédiaires (plat, secteurs entre ouest et ouest-nord-ouest et entre sud-est et est-nord-est) sont considérées comme neutres et affectées d'un facteur exposition de 2.

La note finale de capacité de réserve en eau potentielle des sols (facteur réserve en eau) en 4 classes est ensuite calculée par croisement entre les deux facteurs "sol" et "exposition" selon le tableau suivant :

		facteur «exposition»		
		1	2	3
facteur «sol»	1	1	1	1
	2	1	2	3
	3	3	3	4

Calcul de l'indice brut de sensibilité potentielle de la végétation

Cet indice brut en cinq classes est obtenu par croisement entre les facteurs "végétation" et "réserve en eau" selon le tableau suivant (Cf. Carte 1) :

		facteur «réserve en eau»			
		1	2	3	4
facteur «végétation»	1	1	1	2	3
	2	1	2	3	3
	3	2	3	4	5
	4	3	4	5	5

Modélisation de la sensibilité à l'horizon 2040

La sensibilité potentielle évaluée précédemment ne s'exprimera que là où les conditions météorologiques seront semblables à celles actuellement observées en région méditerranéenne. Pour cette partie de

l'étude, la contribution de Météo-France a été très importante pour modéliser l'évolution des conditions météorologiques et définir les zones où elles s'exprimeront.

Evolution des conditions météorologiques

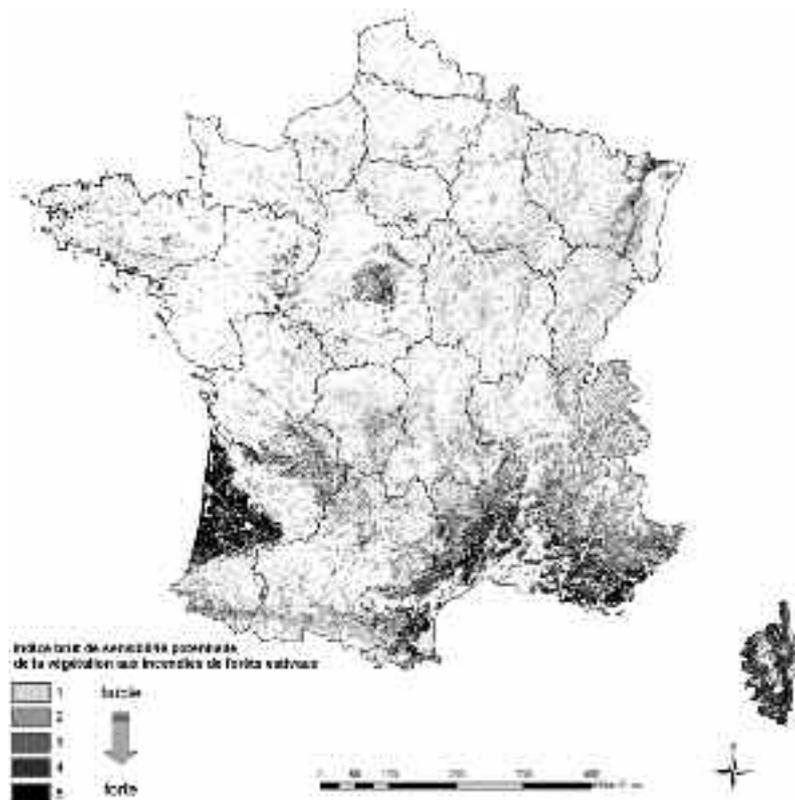
Pour caractériser l'influence des conditions météorologiques sur le risque d'incendie, il a été choisi de travailler sur l'Indice Forêt Météo (IFM). Cet indice est utilisé au quotidien par les services de Météo-France en appui aux autorités de Sécurité Civile, et est calculé à partir de données météo qu'il est possible de modéliser : température, humidité de l'air, pluies et vitesse du vent moyen. A l'échelle nationale, une étude de Météo-France a montré que les moyennes annuelle ou estivale de l'IFM sont fortement corrélées au nombre de feux et à la surface brûlée.

A partir d'analyses réalisées sur les données mesurées de la période de référence 1989-2008, la valeur caractérisant le mieux les conditions météorologiques méditerranéennes est un IFM moyen sur la saison estivale (du 15 mai au 15 octobre) supérieur à 14. Le critère retenu pour caractériser l'évolution du climat est la fréquence à laquelle l'indice IFM moyen estival dépasse cette valeur de 14.

Parmi trois hypothèses d'émission de gaz à effet de serre (A2, B1 et A1B) pour lesquelles Météo-France avait des données calculées à partir du modèle de climat ARPEGE-Climat, le scénario le plus défavorable (A2) a été retenu. Pour décrire l'horizon 2040, Météo-France a calculé, pour chaque année d'une période de 20 ans (2031-2050), l'IFM moyen estival, à partir de données de ce scénario corrigées par une méthode quantile-quantile au pas de temps quotidien sur des pixels de 8 km. Sur cette période, on calcule ensuite l'indice de fréquence des conditions météo semblables aux conditions méditerranéennes, basé sur la fréquence à laquelle l'indice IFM moyen estival dépasse le seuil de 14 :

- indice 1 : moins d'1 an sur 4 (inférieur à 5 fois en 20 ans) ;
- indice 2 : entre 1 an sur 4 et 1 an sur 2 (5 à 9 fois en 20 ans) ;
- indice 3 : plus d'1 an sur 2 (supérieur ou égal à 10 fois en 20 ans).

Cf. Cartes 2.



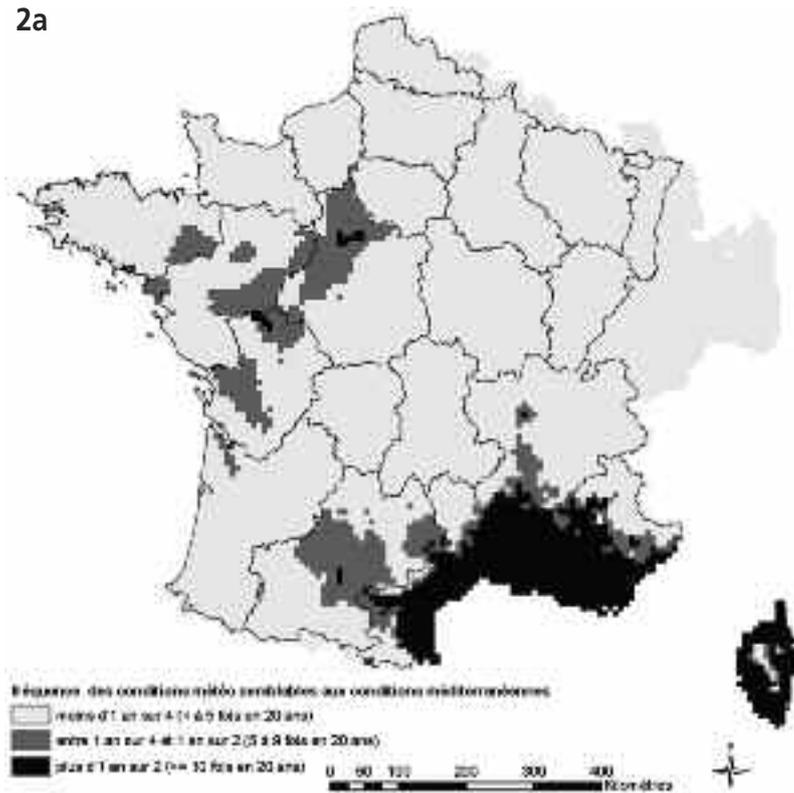
Carte 1 : Indice brut de sensibilité potentielle de la végétation aux incendies estivaux

Calcul de l'indice de sensibilité pour la période considérée

L'indice de sensibilité pour la période considérée résulte du croisement de l'indice brut de sensibilité potentielle de la végétation avec l'indice de fréquence des conditions météo semblables aux conditions méditerranéennes, selon le tableau suivant :

		indice brut de sensibilité potentielle de la végétation		
		1 ou 2	3	4 ou 5
indice freq. météo	1	1	1	2
	2	1	2	3
	3	2	3	4

2a



Synthèse par massifs supérieurs à 100 ha

Au vu de la précision de la méthode utilisée, et pour un rendu au niveau du territoire national, c'est la seule unité d'analyse pertinente. Les calculs réalisés à l'échelle de pixels de 50 m (taille du pixel de la donnée la plus précise disponible à savoir le MNT de l'IGN, les données moins précises étant redécoupées à cette taille) ne sont que des étapes intermédiaires et ne doivent pas être interprétés à cette échelle, car la précision de certaines données (en particuliers types de peuplements de l'IFN, carte des sols et modèles météo) est bien inférieure à cette échelle.

En regroupant entre elles les surfaces en espaces naturels (tous types de peuplements confondus) distantes de moins de 100 m, puis en redécoupant certains regroupements trop vastes selon les régions forestières, l'IFN a produit une carte des massifs forestiers, dont on n'a conservé que les massifs d'une surface totale supérieure à 100 ha.

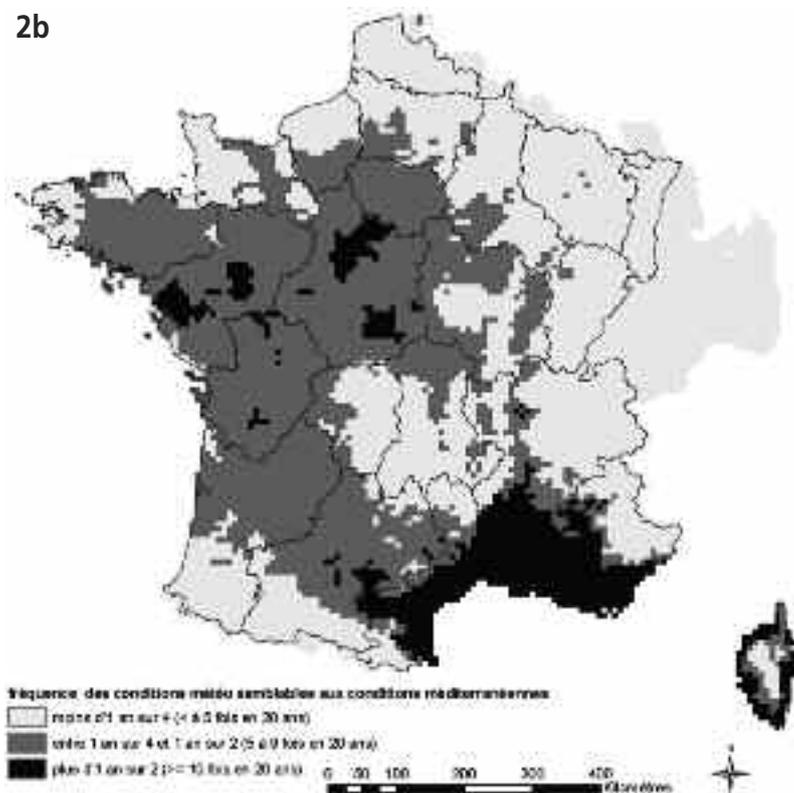
Pour chaque massif, on calcule la moyenne de l'indice de sensibilité pour la période considérée et on définit trois classes de sensibilité :

- classe 1 : massif peu sensible, indice moyen inférieur ou égal à 1,6 ;
- classe 2 : massif sensible, indice moyen entre 1,6 et 2,5 ;
- classe 3 : massif très sensible, indice moyen supérieur ou égal à 2,5.

A titre de comparaison, le même travail a été fait pour la période de référence 1989-2008 et pour l'horizon 2040.

Cf. Cartes 3.

2b



Conclusion

Pour travailler à l'échelle nationale et au pas de temps demandé, cette étude a dû se baser sur un certain nombre d'hypothèses et d'approximations, souvent réductrices par rapport à une réalité beaucoup plus complexe. Ce travail demande à être approfondi

Cartes 2 :

Fréquence des conditions météo semblables aux conditions méditerranéennes

2a : pour la période de référence 1998-2008

2b : modélisation 2040

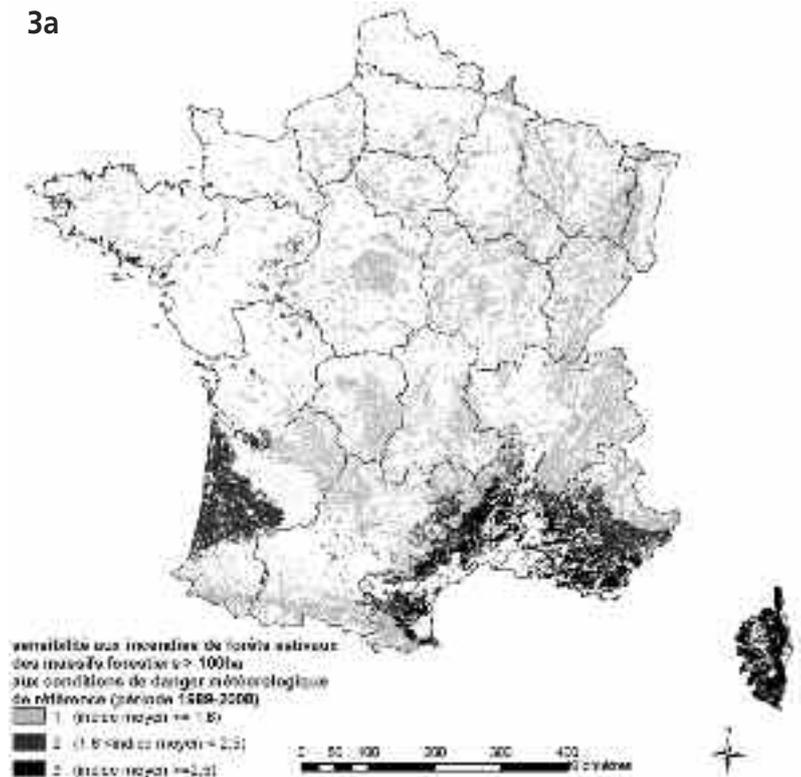
et affiné, notamment en améliorant les cartographies des sols et de la végétation, en précisant les modélisations météo et en caractérisant mieux la sensibilité des formations en place par une meilleure analyse des phénomènes d'incendie de forêts hors zone méditerranéenne.

On ne doit pas chercher à utiliser les résultats pour une analyse locale mais, à l'échelle nationale, ils donnent une bonne idée de ce que pourrait être la situation d'ici une trentaine d'années.

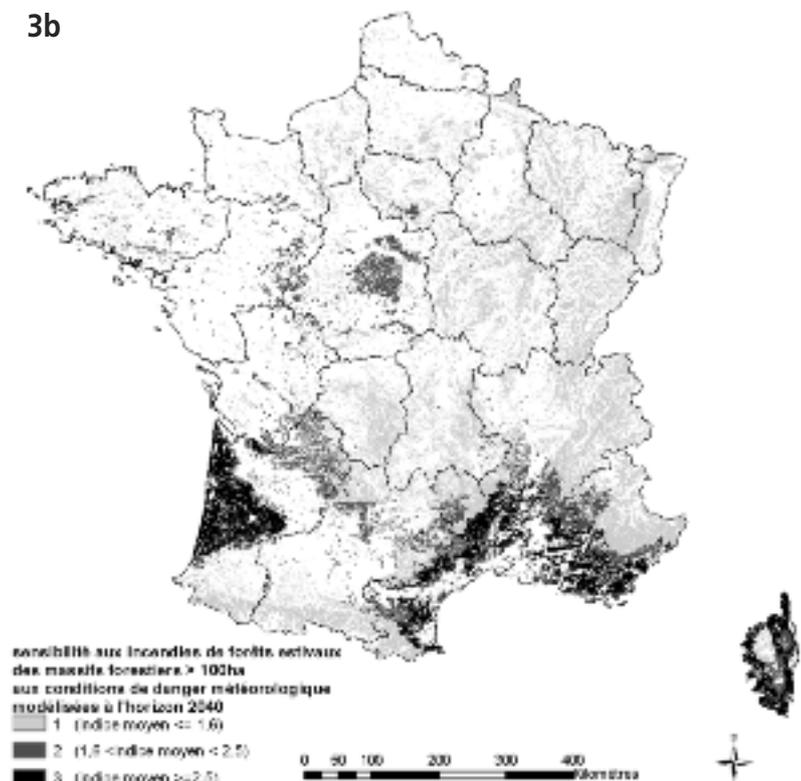
D'après cette étude on passerait d'environ 5 millions d'hectares de massifs sensibles ou très sensibles aux feux estivaux pour la période de référence 1989-2008 à environ 6,5 millions d'hectares de massifs sensibles à l'horizon 2040, soit 40% de la surface totale en espaces naturels non agricoles de la France métropolitaine.

Les résultats de cette étude ont été repris par les membres de la mission interministérielle sur l'extension des zones sensibles aux feux de forêts comme base de leur réflexion sur les politiques à venir. Le rapport de la mission daté de juillet 2010 est disponible sous le lien suivant : <http://www.ladocumentationfrancaise.fr/rapports-publics/104000494/index.shtml>

3a



3b



Cartes 3 :

Sensibilité aux incendies de forêts estivaux des massifs forestiers supérieurs à 100 ha aux conditions de danger météorologique :
 3a : de référence sur la période 1998-2008
 3b : modélisées à l'horizon 2040

Yvon DUCHÉ et Rémi SAVAZZI
 Office national des forêts
 Mission zonale DFCI
 Mél : remi.savazzi@onf.fr

Loïc COMMAGNAC
 Inventaire forestier national

Emmanuel CLOPPET et Mathieu REGIMBEAU
 Météo-France

Résumé

L'étude présentée a été réalisée conjointement par l'ONF, l'IFN et Météo-France, sur commande de la mission interministérielle sur l'extension des zones sensibles aux feux de forêts, qui a rendu son rapport en juillet 2007.

Il s'est agi de modéliser la sensibilité de la végétation aux feux estivaux, sur l'ensemble du territoire français, en se basant sur un certain nombre d'hypothèses, par analogie avec ce que les experts connaissent des feux de l'arrière-pays méditerranéen. Les différents paramètres (végétation, réserve en eau des sols, météo) pris en compte, les hypothèses sur leur évolution et la façon de les combiner sont exposés, puis les cartes résultantes sont présentées pour la période de référence (1989-2008), ainsi que pour les modélisations aux horizons 2040 et 2060.

Pour terminer, les conclusions de la mission sont évoquées dans leurs grandes lignes en renvoyant au rapport pour plus de détails.

Summary

Attempt at mapping massifs likely to be susceptible to summer wildfire around 2040

The study presented here, carried out jointly by the ONF (French National Forestry Commission), the INF (National Forest Inventory) and *Météo-France* (national weather forecasting), was commissioned by the Joint Ministerial Committee on the Extension of Areas Sensitive to Forest Fires which submitted its report in July 2007.

The aim was to model the sensitivity of vegetation to summer wildfire throughout the whole of France, basing the work on a number of hypotheses built up by analogy with what experts know about forest fires in the Mediterranean hinterland. First, the different parameters (plant cover, reserves of ground-water, weather) taken into account, the hypotheses about their evolution and the way of combining them are presented; then the resulting maps are given for the reference period (1989-2008) as well as for the models for around 2040 and 2060.

Finally, the gist of the conclusions of the committee is given with reference to the report for more details.

Riassunto

Prova di cartografia dei massicci potenzialmente sensibili agli incendi estivi all'orizzonte 2040

Lo studio presentato è stato realizzato congiuntamente dall'ONF, l'IFN e Meteo France, su ordinazione della missione interministeriale sull'estensione delle zone sensibili ai fuochi di foreste, che ha reso il suo rapporto in luglio 2007. Si tratta di modellizzare la sensibilità della vegetazione ai fuochi estivi, sull'insieme del territorio francese, basandosi su un certo numero di ipotesi, in analogia con quel che gli esperti conoscono dei fuochi dell'entroterra mediterraneo. I diversi parametri (vegetazione, riserva in acqua dei suoli, meteo) presi in conto, le ipotesi sulla loro evoluzione e il modo di combinarle sono esposti, dopo le mappe risultanti sono presentate per il periodo di riferimento (1989-2008), come per le modellizzazioni agli orizzonti 2040-2060.

Per terminare, le conclusioni della missione saranno evocate nelle loro grandi linee rimandando al rapporto per più dettagli.

Comment une collectivité et les services de lutte s'organisent-ils face à une augmentation des risques incendies ? *L'exemple du département du Var*

par Jean LABADIE et Stéphane FARCY

Face à la perspective d'une augmentation des risques incendies, nous avons demandé à Jean Labadie et Stéphane Farcy, respectivement forestier au Conseil général du Var et lieutenant colonel au Service d'incendie et de secours du même département, de nous décrire comment leurs institutions anticipent la question : réflexions, nouvelles politiques, stratégies d'interventions, premières mesures...

L'été 2003 a été une saison terrible en matière de feux de forêts, tout particulièrement dans le département du Var, qui a vu 20 000 ha de forêt partir en fumée et sept victimes périr, dans des conditions météorologiques extrêmes. Or cette situation, du fait des changements climatiques, risque de devenir de plus en plus fréquente.

Le département du Var a une forte expérience en matière de grands incendies, et a contribué à la cellule REX (retour d'expérience) avec tous les partenaires du réseau coupures de combustible. Quels enseignements ont été tirés et effectivement mis en œuvre depuis dans ce département ? Jean Labadie nous répond.

Le contexte

par Jean Labadie

Dans l'article précédent de R. Savazzi (Cf. pp. 217-224), il a été précisé que la zone à risque très élevé de grands incendies pourrait s'étendre dans les années futures. Mais le curseur a été placé de telle sorte, que nous sommes déjà, pour le département du Var, dans ce degré de risques le plus élevé.

Le risque pour le département du Var va-t-il encore augmenter ? Aurons-nous un allongement des saisons à risques ? Aurons-nous une occurrence plus importante d'années exceptionnelles telles que 2003 ?

La tendance attendue serait celles d'années à forte canicule et avec moins de vent que par le passé. C'est effectivement ce qu'il s'est déjà passé dans le Var en 2003.

A la suite des événements dramatiques de 2003, une première réflexion a été engagée dans le cadre du Réseau coupures de combustibles. D'autres réflexions l'ont accompagnée dont celle de la mission interministérielle sur les feux de forêt, celle organisée à Toulon par l'association Forêt Méditerranéenne qui s'est intitulée « Les assises de la forêt varoise » en juin 2004, et une séance de travail du Conseil général du Var du 3 octobre 2003 qui s'est traduite par l'adoption d'une nouvelle politique pour la protection de la forêt contre l'incendie, votée en décembre de la même année.

Dans les paragraphes suivants ne seront développés que les trois points importants dans lesquels le Conseil général est le plus impliqué. Il existe en effet d'autres aspects sur lesquels des marges d'amélioration énormes ont été réalisées, notamment la recherche des causes, dont il faudrait maintenant utiliser les résultats.

Le travail en commun

Au cours de ces réflexions, nous avons appris à travailler en commun, puis nous avons vu tout le bénéfice que nous pouvions avoir à mettre nos moyens en commun. Cela s'est traduit par la formalisation de groupes de travail.

Le comité technique départemental

C'est un groupe de travail au niveau départemental qui rassemble tous les acteurs de la DFCI (Défense de la forêt contre l'incendie). Sous la double présidence du préfet et du président du Conseil général, il rassemble tous les acteurs de la lutte et de la prévention contre les incendies de forêt, de niveau départemental : Direction départementale des territoires et de la mer, Service départemental d'incendie et de secours, Association des communes forestières, Association départementale des Comités communaux feux de forêt, Syndicat des propriétaires forestiers, services du Conseil général. Le travail de ce groupe consiste essentiellement à coordonner les actions de chacun, aider à définir des doctrines ou des stratégies communes.

Le comité de massif

C'est un groupe de travail au niveau de chaque massif défini dans le Plan départemental de protection de la forêt contre l'incendie. Il permet de réunir les divers maîtres d'ouvrages DFCI, plus nombreux dans le Var que dans les autres départements, les techniciens des différentes structures en charge de la DFCI ou de la forêt et les responsables des groupements du Sservice départemental d'incendie et de secours. Le travail de ce groupe permet, entre autres, de coordonner la programmation des travaux entre les différents maîtres d'ouvrage et d'échanger sur l'opportunité technique des options choisies.

Le comité de secteur

C'est un groupe de travail à l'échelle des communes. Sous la présidence du Maire, l'ensemble des acteurs locaux pour la protection contre les incendies de forêt assiste la commune pour lui permettre d'améliorer la protection des zones urbanisées contre les feux de forêt. Le maire dispose ainsi lors des réunions des avis des techniciens des divers organismes en lien avec la protection des zones urbanisées contre les feux de forêt.

Des ouvrages pour les très grands incendies

Pour combattre les très grands incendies qui se développent dans des conditions extrêmes, les réflexions ont conduit à privilégier des ouvrages stratégiques :

- mieux situés en terme d'aérodynamisme et de pente,
- mieux positionnés dans le massif, en terme d'enjeux et de surface menacée,
- mieux dimensionnés par rapport aux puissances d'incendies à redouter.

Un guide technique des équipements DFCI propre au département a été rédigé sous la direction du Service départemental d'incendie et de secours, avec le concours des différents partenaires en charge de la prévention et de la lutte. Il comporte des préconisations sur le dimensionnement des équipements qui vont au-delà des normes zonales.

Un réseau d'axes stratégiques dans le massif des Maures a pu être établi par la Direction départementale des territoires et de la mer, en collaboration avec tous les par-

tenaires. Ce travail se poursuit sur d'autres massifs fortement soumis au risque incendie comme le massif de l'Estérel.

Le département a également orienté le débroussaillage obligatoire des bords de routes départementales en ce sens. Lorsque la position de la route le permet, elle sert d'appui à un véritable ouvrage DFCI.

Il s'agit de privilégier des ouvrages permettant une action efficace sur les très grands feux. Cette stratégie d'équipement est partie d'un choix. Si la stratégie donne toujours la priorité aux feux naissants, l'équipement du terrain doit privilégier le scénario, de plus en plus probable, de lutte contre un très grand incendie.

Améliorer la protection des zones urbanisées

Le troisième point concerne la protection des zones urbanisées. Une des conclusions de la mission interministérielle a été que « *sur un feu catastrophe le risque concerne les dégâts aux personnes et à l'urbanisation* ».

Il s'agit d'aider les communes à améliorer l'autoprotection de leurs zones urbanisées. Le débroussaillage autour des zones urbanisées est l'action la plus efficace. Le retour d'expérience effectué par la commune du Plan-de-la-Tour, après les incendies de 2003 sur ce point et relayé par le DVD élaboré par les communes forestières, a été éloquent.

Il s'agit à travers le dispositif appelé comité de secteur, (déjà évoqué dans le premier point) d'apporter un appui technique aux communes pour les aider à sensibiliser les habitants des zones à risques sur le débroussaillage autour des habitations. Dans un deuxième temps, des exercices permettent à la commune de se préparer à une gestion de crise incendie de forêt. Ces exercices sensibilisent également à la mise en place d'un plan communal de sauvegarde. Les techniciens forestiers du département aident l'équipe municipale par un appui logistique et méthodologique.

Il s'agira dans l'avenir de maintenir dans le temps cette culture du risque feux de forêt, et plus largement du risque naturel. Les événements dans le Var — les inondations en juin 2010 ont également fortement marqué les varois — et les dramatiques incendies du Portugal (2005), de Grèce

(2007) ou de Russie (2010) nous y aident malheureusement. Ils nous confirment qu'il faut encore et encore se préparer et s'organiser avant les futures catastrophes.

La position des services de lutte contre les incendies

par Stéphane Farcy

Les perspectives d'un changement climatique et ses répercussions sur la forêt méditerranéenne risquent d'avoir des conséquences non négligeables sur le développement et la lutte des incendies de forêt.

Bien que nous n'ayons pas encore le recul nécessaire pour pouvoir appréhender et estimer de tels impacts, il nous est possible cependant d'émettre quelques hypothèses à partir des situations exceptionnelles que le département du Var a connu au cours de l'année 2003 et des années de sécheresse qui ont perduré jusqu'en 2008.

Photo 1 :

Le feu de La Motte, le 28 juillet 2003, ce jour-là 28 départs de feux ont été enregistrés dans le Var
Photo SDIS 83



Jean LABADIE
Conseil général du Var
Mél :
JLABADIE@cg83.fr
Direction du Génie
Forestier
Immeuble Oméga
77, impasse Lavoisier
Quartier les Fourches
83160 LA VALETTE
Tél. : 04 94 18 40 90
Fax : 04 94 20 79 41

Lieutenant Colonel
Stéphane FARCY
Service départemental
d'incendie et de
secours du Var
Mél : sfarcy@sdis83.fr

Photo 2 :

En matière de lutte, le pré-positionnement des engins dans les endroits stratégiques devra être quasi systématique.

Photo DA

Effectivement, l'équation réchauffement climatique, augmentation des températures, diminution des précipitations et allongement des durées de sécheresse, a une répercussion bien réelle sur l'augmentation des risques d'incendie de forêt.

Au-delà donc d'une telle incidence, il est apparu au cours de l'été 2003 un phénomène bien particulier et qui s'est reproduit à quelques reprises sur des feux de l'Est Var. En effet, des vitesses de propagation des incendies très élevées et surtout bien supérieures aux prévisions et estimations habituelles ont été constatées. Il a été établi, notamment grâce à l'étude du cabinet MTD, que la vitesse de propagation du feu « Vidauban I » du 17 juillet 2003 n'a cessé de croître allant de 1,3 km/h à 6,7 km/h et ce, malgré un vent modéré de 30 à 40 km/h. De telles vitesses n'avaient jamais, jusqu'à présent, été observées.

Aussi, le vent généralement associé à cette vitesse ne pouvait être la variable principale des modes de calcul habituels. La sécheresse des végétaux (vivants et morts), l'hygrométrie et la température de l'air sont, à l'évidence, des paramètres essentiels, supplantant dans ces situations extrêmes, la force du vent. En cas de changements climatiques, ces données seront donc prépondérantes et favoriseront, à n'en point douter, l'émergence de feux de forêt à cinétique très rapide.

Nous avons pu également observer les années suivantes, marquées elles aussi par d'importants épisodes de sécheresse sur l'Est Var, des feux se développant à des vitesses extrêmement rapides : 2 000 m/h pour le feu de la Motte de 2007 (Vp théorique annoncée à 700 m/h) ; 3 300 m/h pour le feu du Muy de 2009 (Vp théorique annoncée à 967 m/h) ; 2500 m/h pour le feu de Roquebrune de 2005 (Vp non connue ce jour).

Pour les services d'incendie et de secours, les conséquences inhérentes à ces changements climatiques prévisibles vont principalement s'orienter sur le renforcement des actions de prévention et du dispositif de lutte.

Face à des feux plus rapides et plus intenses, il sera vraisemblablement nécessaire de disposer d'ouvrages de DFCI et de zones d'interfaces habitat-forêt parfaitement équipées pour « recevoir » de tels feux. Le Conseil général du Var développe dans les premiers paragraphes cette problématique.

En matière de lutte, afin de pouvoir atteindre encore plus rapidement un point d'écllosion, le renforcement du maillage territorial par les engins de lutte et leur pré-positionnement dans des endroits stratégiques devra être quasi systématique.

De même, l'emploi de moyens aériens (avions et hélicoptères) restera un élément primordial pour traiter au plus vite tous départs de feux. La disponibilité et la quantité des aéronefs devront elles aussi être réétudiées.

Enfin, les principes actuels de l'attaque massive (maximum de moyens dès les premiers instants) et la priorité donnée aux feux naissants resteront dans ces circonstances les garants d'une action cohérente et univoque.

Il semble donc dans de telles hypothèses, que de plus en plus de forêts soient concernées par le risque d'incendie. Les feux, plus nombreux, plus rapides et plus intenses vont marquer, au risque de le modifier, l'espace forestier méditerranéen. Le risque incendie représentera donc à brève échéance un facteur déterminant dans la gestion de ce patrimoine.

J.L., S.F.



Didactique des sciences et éducation au développement durable : processus et enjeux

par Pierre CLEMENT

***Une des questions posées lors du colloque a été, non seulement, comment faire comprendre les enjeux du changement climatique à la société, anticiper les incompréhensions et les conflits d'analyse et de perceptions ?...
...mais aussi, comment sortir du débat entre techniciens initiés pour rendre valorisables les informations scientifiques, par les gestionnaires, et aussi par les enseignants ?
Cet article nous présente quelques éléments pour mieux comprendre comment se construit le transfert des connaissances : du monde scientifique à la sphère technique jusqu'au "grand public", notamment en matière d'éducation à l'environnement et, plus particulièrement, de forêt méditerranéenne.***

Didactique des sciences, éducation au développement durable (EDD), compétences

La didactique des sciences

Classiquement, la didactique d'une discipline s'intéresse aux processus de transmission / appropriation de connaissances dans cette discipline, dans tout contexte : scolaire ou extrascolaire, professionnel ou par les médias, loisirs, etc. Elle prend aussi en compte les motivations, attitudes, savoir-faire, les valeurs et les pratiques sociales de ceux qui construisent leurs connaissances.

Alors que la pédagogie s'intéresse aux relations entre enseignants et apprenants quel que soit le contenu enseigné, la didactique d'une discipline scientifique est centrée sur l'acquisition de connaissances spécifiques à cette discipline (Cf. Fig. 1), ce qui dépend de l'ensemble du système qui entoure cette acquisition.

C'est l'apprenant qui construit ses propres connaissances (constructivisme), à partir de ses conceptions initiales (qui font parfois obstacle à ses apprentissages) dans un contexte social (socio-constructivisme) qui parfois renforce ses conceptions initiales.

La personne qui souhaite transmettre des connaissances (enseignant, formateur, médiateur, journaliste, muséologue...) a pour principale fonction de créer les contextes (les situations didactiques : BROUSSEAU 1998¹) les plus favorables à cet apprentissage.

1 - Brousseau G., 1998 – *Théorie des situations didactiques*. Grenoble : La Pensée Sauvage

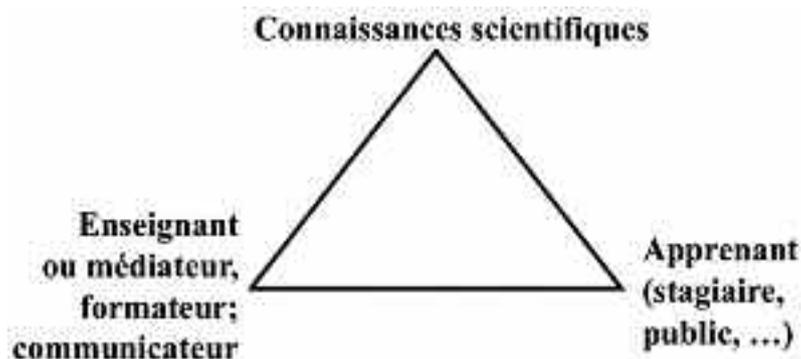


Fig. 1 :
Le triangle didactique, classique en France dans les années 1970 et 1980.

L'éducation au développement durable (EDD)

Déjà l'Éducation à l'environnement ne se limitait pas à la transmission de connaissances, elle en définissait quatre dimensions : écologique, économique, sociale et culturelle². Mais la complexité des situations environnementales devient plus explicite encore avec l'Éducation au développement durable (EDD) : « *L'éducation est essentielle pour susciter une conscience des questions écologiques et éthiques, ainsi que des valeurs et des attitudes, des compétences et un comportement compatibles avec le développement durable, et pour assurer une participation effective du public aux prises de décision* » (l'Agenda 21, issu de Rio : ONU, 1992, p. 229)

Le rapport Brundtland (1987) a défini ainsi le développement durable (DD) : « *un développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures de répondre aux leurs* ».

L'EDD apparaît alors comme à l'intersection de trois dimensions : environnementale (centrée alors sur l'écologie), sociale et économique (Cf. Fig. 2), qui elles-mêmes comportent des dimensions culturelles, politiques et éthiques.

« Développement » durable ne peut pas signifier « croissance » durable. En effet, la Terre ne supporterait pas que tous les pays atteignent un niveau économique (en terme de consommation par exemple) comparable à celui des USA aujourd'hui. Les pays les plus « développés » devraient plutôt envisager une « décroissance soutenable » (LATOUCHE 2006³).

Nombre de pays ont refusé d'utiliser le terme « développement » de l'EDD⁴, continuant à utiliser *Educación ambiental* dans les pays d'Amérique latine tels que la Colombie ou le Brésil où l'Éducation à l'environnement avait déjà une dimension politique et sociale importante, ou encore *Environmental Education for Sustainability* en Australie, la notion de durabilité (*sustainability*) ne suscitant pas les mêmes réticences. En France, le débat est assez vif, mais il me semble qu'il peut être désamorcé si on considère, comme c'est fréquent en biologie, que le développement ne signifie pas nécessairement croissance. Je me réfère par exemple au développement de la grenouille (Cf. Fig. 3) : durant les derniers stades de son développement, le têtard diminue de taille, sa queue rapetisse, si bien que l'adulte (à vie désormais aérienne) semble plus petit que le têtard dont il est issu. Ainsi le développement peut signifier « transformation », « métamorphose », « nouvelle adaptation à l'environnement » plutôt que croissance avec augmentation de taille.

Plus importante est l'étendue des thèmes couverts par l'EDD, car ils correspondent aux trois champs schématisés dans la figure 2. Le tableau I les catégorise en fonction de ces trois dimensions, ce qui me semble insatisfaisant car, pour chacun des thèmes listés, ces trois dimensions sont impliquées. Je préfère donc la représentation en soleil proposée en Suède (Cf. Fig. 4) ou encore la liste du tableau II où la plupart des thèmes ont un intitulé citoyen qui mobilise les dimensions sociales, économiques, environnementales ainsi que culturelles et politiques.

Les valeurs qui sous-tendent l'EDD ont été identifiées dans plusieurs travaux et rap-

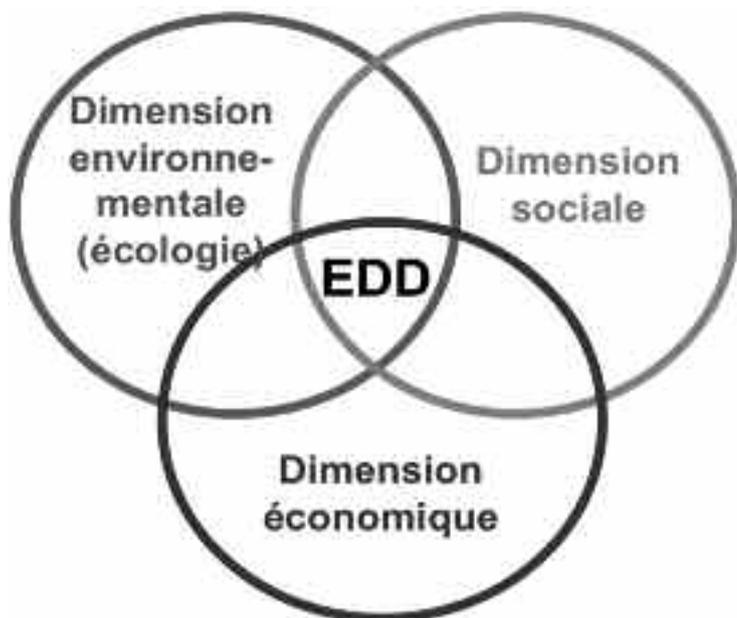


Fig. 2 :
L'EDD à l'intersection des dimensions sociale, économique et environnementale.

ports internationaux. CARAVITA *et al.* (2008)⁶ en ont présenté une synthèse pour l'Éducation à l'environnement (EE). Tous les textes officiels sur l'EE mentionnent deux de ces valeurs : le « respect » (de l'environnement) et la « responsabilité » des élèves / citoyens⁷. Plusieurs autres travaux indiquent un consensus sur des valeurs de base de l'EE, qui ont parfois été nommées STAR (solidarité, tolérance, autonomie et responsabilité⁸). Il s'agit surtout de la catégorie « valeurs morales » proposée par CARAVITA *et al.* 2008.

Ces valeurs sont plus encore présentes dans l'EDD, où elles sont centrées sur la notion de durabilité, donc d'une solidarité fondamentale avec les générations futures, qui ne doit pas bien sûr négliger la solidarité avec les générations actuelles, ni avec ce qui permet la vie sur notre Planète. Elles se fondent sur la déclaration universelle des droits de l'homme et du citoyen, pour la lutte contre les inégalités, les exclusions, la pauvreté, en y rajoutant d'autres objectifs tels

Décennie de l'éducation en vue du développement durable

Perspectives stratégiques pour guider l'éducation et l'apprentissage pour le développement durable

Perspectives socioculturelles

- Droits de l'homme
- Paix et sécurité humaine
- Egalité entre les sexes
- Diversité culturelle et compréhension interculturelle
- Santé
- VIH/SIDA
- Gouvernance

Perspectives pour l'environnement

- Ressources naturelles (eau, énergie, agriculture, biodiversité)
- Changement climatique
- Développement rural
- Urbanisation durable
- Prévention et réduction des catastrophes

Perspectives économiques

- Réduction de la pauvreté
- Responsabilité des entreprises
- Économie de marché

Tab. I (ci-contre) :

Les thèmes de l'EDD dans la DEDD (UNESCO 2006, p. 18-20)⁵

5 - UNESCO (2006) - Framework for the UN DESD (Decade of Education for a Sustainable Development) International Implementation Scheme. <http://unesdoc.unesco.org/images/0014/001486/148650E.pdf>

6 - Caravita S., Valente A, Luzi D., Pace P., Khalil I., Berthou G., Valanides N., Kozan-Naumescu A., Clément P. (2008). Construction and validation of textbook analysis grids for ecology and environmental education. *Science Education International*, 19, 2, p. 97-116.
 7 - Forissier T., 2003. Les valeurs implicites dans l'Éducation à l'Environnement. Analyse de la formation d'enseignants de SVT et des conceptions de futurs enseignants français, allemands et portugais ». Thèse doctorat Univ. C.Bernard Lyon 1.
 8 - Goffin L., 1992 – *Problématique de l'environnement*. Fondation universitaire luxembourgeoise – Arlon.

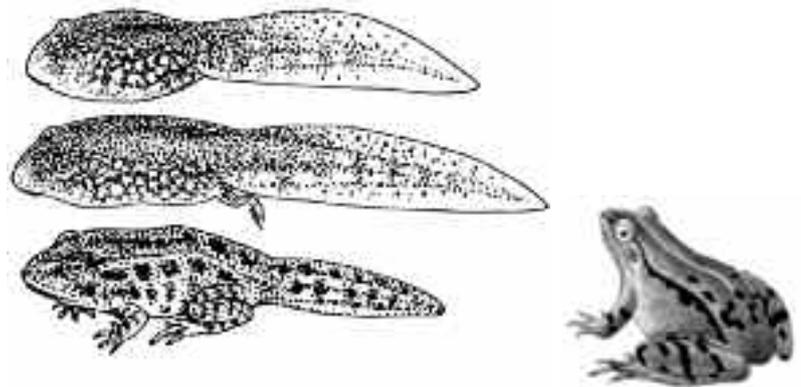


Fig. 3 (ci-dessus) : Métaphore du développement de la grenouille : l'adulte (à droite) paraît plus petit que les derniers stades du têtard (à gauche)

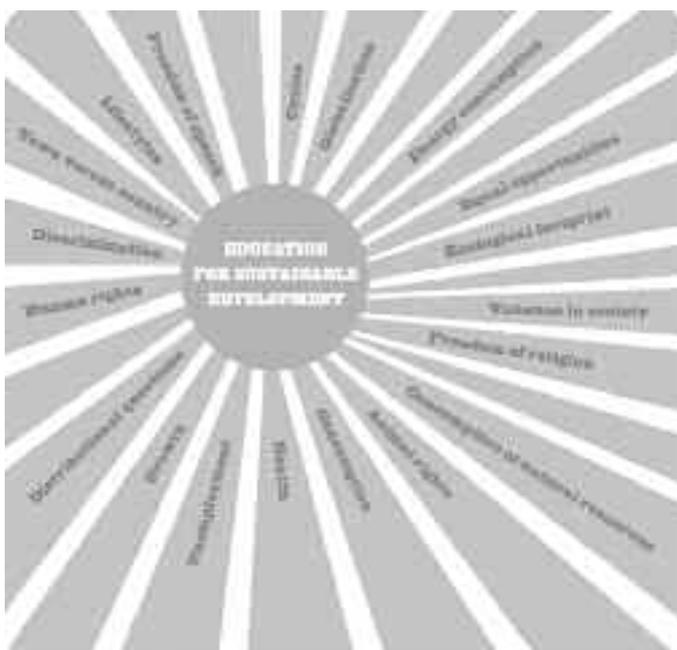


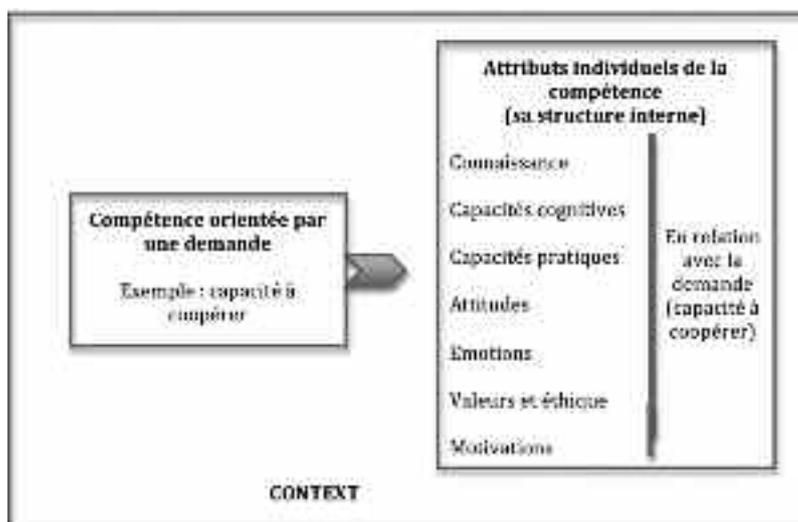
Fig. 4 (ci-contre) : Transmitted by the Swedish National Agency for Education 2010

La surface du cercle qui est au centre du soleil représente les processus à la base de l'EDD, les activités transdisciplinaires, l'esprit critique pour toute communication ou action. Les rayons du soleil représentent les contenus, les thèmes proposés pour les discussions et actions. Certains rayons sont vides. Ce qui symbolise la complexité de l'EDD : personne ne peut prédire tous les thèmes liés aux dimensions environnementales, sociales ou économiques qui vont émerger dans votre établissement scolaire (ou préscolaire) précis.

Thèmes		Culturel		
		Social	Econo- mique	Environ- nemental
1	Citoyenneté par la démocratie. Dans tous les domaines. Formes de participation civiles. Transparence.	X	(X)	(X)
2	Droits de l'homme et du citoyen. Egalité des sexes, des groupes ethniques. Liberté de religion, d'expression politique, d'orientation sexuelle. Etc. Construction de la cohésion sociale. Equité sociale, gestion de la diversité, lutte contre la discrimination, contre la violence.	X	X	(X)
3	Lutte contre la pauvreté. Analyse de ses causes et conséquences au niveau local et global (pays, relation Nord-Sud). Inégalités sociales, d'accès aux ressources, aux richesses. Migrations et immigrations... Propriété privée. Vol. Justice.	X	X	X
4	Processus de production, de commercialisation et de consommation (de biens, d'aliments, d'énergie,...). Etat des lieux, évolutions et alternatives (durables). Gaspillages, gestion des déchets... Gestion des ressources naturelles et humaines. Gestion et développement du capital humain. Savoirs indigènes. Formes d'agriculture et alternatives. Exploitation durable des ressources... Globalisation. Pouvoirs économiques, financiers, politiques, médiatiques. Contre-pouvoirs.	X	X	X
5	Changement climatique. Ses causes. Les possibilités d'action. Désertification. Politique énergétique. Energies fossiles ou renouvelables. Emission de gaz à effet de serre. Gaspillages. Alternatives.	X	X	X
6	Santé et bien-être. Qualité de la vie chez soi, au travail, à l'école. Lutte contre le SIDA et autres épidémies. Lutte contre l'abus de tabac, d'alcool, de drogues, de tranquillisants... La santé environnementale. Qualité de l'air, de l'eau, de la nourriture. Accès à l'eau potable. OGM. Pollutions (directement perceptibles ou non). Préservation de l'environnement (interaction avec le thème suivant).	X	X	X
7	Biodiversité. Conservation des espèces, des écosystèmes, des paysages, des cultures. Patrimoine naturel et culturel. OGM. Pesticides... Catastrophes naturelles : prévisions, prévention, conséquences...	X	X	X
8	Tourisme. Formes actuelles et alternatives vertes ou intégrées. Développement rural/urbain. Problèmes de gouvernance. Les transports, en ville, et sur longue distance (lien avec thème sur sources d'énergie, pollution,...)	X	X	X
9	Médias. Leurs influences. Liberté d'expression, d'information, de publications, de création. Education non formelle. Internet et la fracture numérique.	X	X	(X)
10	Guerre et Paix. Dimensions humaines, économiques, politiques, sociales... et conséquences pour l'environnement.	X	X	X
11	Etc.			

Fig. 5 (ci-dessus) :
Le concept de compétence tel que défini par l'UNESCO – DeSeCo
(*Definition and Selection of Competencies*. 2002 : www.deseco.admin.ch)

que le bien-être de chacun (santé, ressources, paix...), la solidarité avec les générations futures, le respect de notre Planète, et la responsabilité de chacun pour promouvoir ces objectifs.



Compétences

Le concept de « compétences » a été introduit dans le système éducatif de la plupart des pays pour exprimer ce qui était attendu des enseignements / apprentissages et pour évaluer la qualité de ces enseignements. Ce concept est devenu un axe majeur dans le renouvellement des curricula à partir de la Recommandation du Parlement européen et du Conseil de l'Europe en septembre 2006. Cependant le concept de compétence est encore controversé. Il est né dans le monde des grandes entreprises pour leurs politiques de ressources humaines et du marché du travail (compétences professionnelles).

Le projet DeSeCo a tenté de parvenir à un consensus sur une définition opérationnelle de la compétence dans le domaine de l'éducation (Cf. Fig. 5). Les compétences y sont définies en tant que capacités à répondre avec succès à des demandes complexes. Chaque compétence correspond à l'interaction entre des capacités cognitives et pratiques : « *knowledge (including tacit knowledge), motivation, capacities, attitudes, values, emotions, mobilized for effective actions in particular contexts* » (UNESCO, DeSeCo = *Definition and Selection of Competencies. Project website*, 2002 : www.deseco.admin.ch).

Conclusions

Ainsi, tout projet de transfert ou de communication de connaissances sur les forêts s'inscrit dans une perspective éducative qui doit réfléchir sur elle-même, sans hésiter à utiliser les concepts que j'ai tenté de définir dans cette première partie.

Ce projet s'inscrit dans le champ de l'EDD dont j'ai tenté de préciser les contours, qui sont loin de se limiter à des connaissances.

Il doit donc en particulier s'interroger sur ses objectifs : développer les seules connaissances des interlocuteurs visés, ou plutôt leurs compétences dans des contextes précis, pour répondre à des demandes en ne mobilisant pas uniquement des connaissances, mais aussi les autres attributs d'une compétence, tels que ceux listés dans la figure 5 ?

Nous allons à présent tenter d'approfondir les interactions entre connaissances et, d'une part, des pratiques sociales sur l'exemple de forêts méditerranéennes, puis avec des valeurs, en présentant dans la troisième partie le modèle KVP (interactions possibles entre connaissances, valeurs et pratiques sociales) puis sa mise en œuvre dans quelques travaux.

Connaissances et pratiques sociales sur les forêts méditerranéennes

Toute connaissance sur une forêt est relative au regard que l'on porte sur elle. Jacob von Uexküll l'exprimait fort bien en 1934⁹ :

« *Il n'existe pas de forêt en tant que milieu objectivement déterminé : il y a une forêt-pour-le-forestier, une forêt-pour-le-chasseur,*

une forêt-pour-le-botaniste, une forêt-pour-le-promeneur, une forêt-pour-l'ami-de-la-nature, une forêt-pour-celui-qui-ramasse-le-bois, ou celui-qui-cueille-des-baies, une forêt de légende où se perd le Petit Poucet. » (J. VON UEXKÜLL, 1934 ; traduction française 1965)

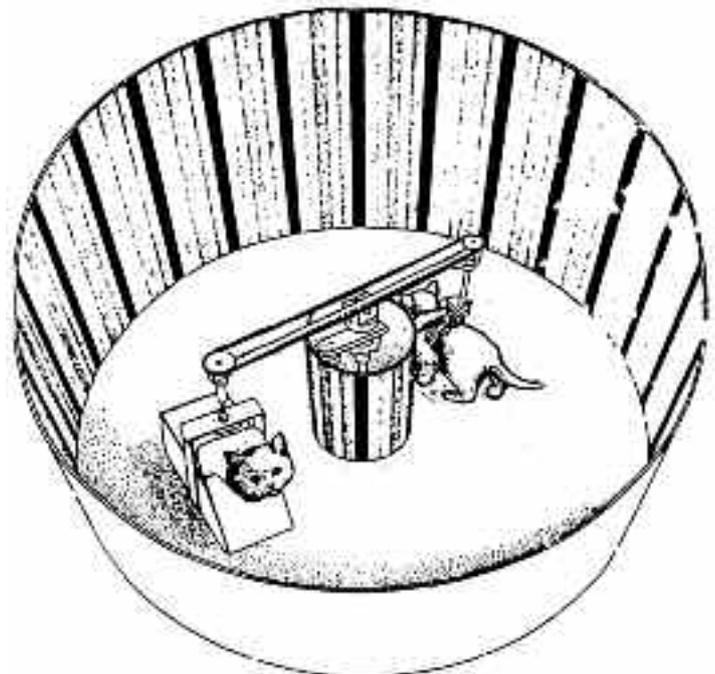
Cet auteur a montré que chaque animal, comme chaque humain, se construit non seulement lui-même, mais construit aussi son monde, son *umwelt*, ce qu'il peut percevoir et ce sur quoi il peut agir, aussi bien sur le plan matériel (spatio-temporel) que sur le plan intellectuel (les concepts maîtrisés...). Ses travaux ont été repris ensuite, précisés et même complétés, en philosophie des sciences (CANGUILHEM 1965) comme en éthologie (CAMPAN 1980) et en sciences cognitives (CLÉMENT *et al.* 1997, STEWART *et al.* 1997, CLÉMENT 1999)¹⁰.

De leur côté, les neurobiologistes ont largement montré que la perception visuelle, par exemple, est toujours couplée à d'autres perceptions, mais aussi à la motricité, à l'apprentissage sensori-moteur (et cérébral). En d'autres termes, on apprend à voir !

La figure 6 illustre l'exemple des chatons. Si, durant une période sensible de leur développement (environ la quatrième semaine de leur vie), ils ne sont placés que dans l'obscurité ou dans une enceinte ne contenant que des lignes verticales, ils deviennent quasi-aveugles aux lignes horizontales. Mais qui plus est, si dans cette enceinte un petit chat est actif et l'autre passif (Cf. Fig. 6), ils ont

- 9 - Uexküll J. von, 1934 – *Mondes animaux et mondes humains* (traduction française, 1965, Paris : Denoël)
- 10 - Canguilhem G., 1965 – *La connaissance de la vie*. Pris : Vrin.
- Campan R., 1980 – *L'animal et son univers*. Toulouse : Privat
- Clément P., Scheps R., Stewart J., 1997 - Une interprétation biologique de l'interprétation. I - Umwelt et interprétation. in "Herméneutique : textes, sciences". J.M.Salanskis, F.Rastier, R.Scheps, éd.PUF, coll. Philosophie d'aujourd'hui, Cerisy, p.209-232
- Stewart J., Scheps R., Clément P., 1997 - Une interprétation biologique de l'interprétation. II - La phylogénèse de l'interprétation. Ibid, p.233-252
- Clément P., 1999 - A chaque animal, son monde : la place du cerveau dans la notion d'umwelt. in P.Buisseret (ed.) : " *Mille cerveaux, mille mondes* ", co-ed. Nathan & MNHN, Paris, p.129-131.
- 11 - Held R. & Hein A., 1963 – Movement produced stimulation in the development of visually guided behavior. *J. Comp. Physiol. Psychol.*, 56, 872-876.

Fig. 6 :
Expérience de Held & Hein (1963)¹¹



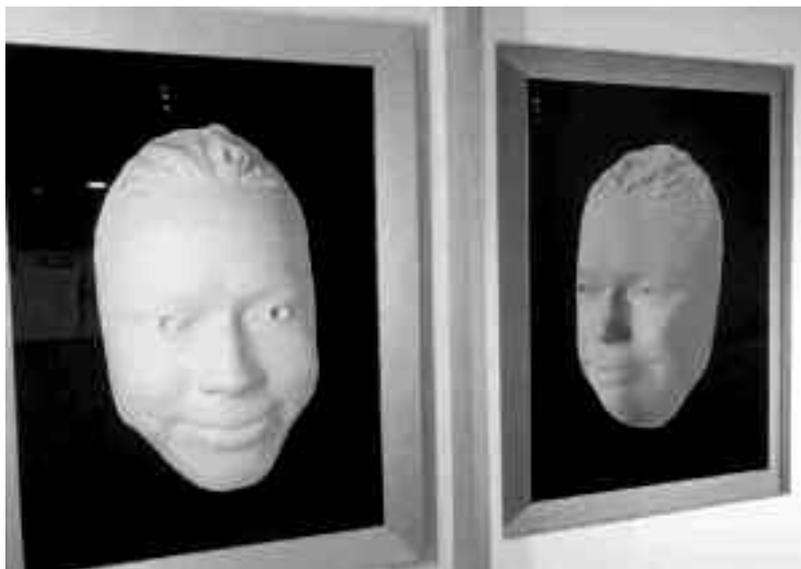


Fig. 7 :

Deux masques du même visage, l'un en relief (à gauche), l'autre en creux (à droite).

Photo P. Clément à la Cité des Sciences et de l'Industrie (La Villette, Paris)

12 - Cheikho M., 2002 - Pluridisciplinarité et foresterie : recherche, gestion, pédagogie de projet et formation des ingénieurs forestiers. Thèse doctorat Université Lyon 1.

Cheikho M., Clément P., 2002 - Pluridisciplinarité et complexité dans la formation au métier d'ingénieur forestier. *Aster*, 34, p.97-130.

Cheikho M., Clément P., 1999 - Comparaison des techniques d'analyse de discours sur la connaissance et la gestion d'une forêt méditerranéenne. in A. Giordan, J.L. Martinand, D. Raichvarg, Technologies, technologie, Actes JIES, 21, p.165-170.

Cheikho M., Clément P., Bariteau M., 1999 - Education à l'Environnement : Conceptions de chercheurs et d'autres acteurs impliqués dans des programmes pluridisciplinaires sur la forêt méditerranéenne. in *L'actualité de la recherche en didactique des sciences et des techniques*. Actes des Premières Rencontres scientifiques de l'ARDIST (Association pour la Recherche en Didactique des Sciences et des Techniques), ENS Cachan, p.51-57.

beau avoir la même expérience visuelle, ils différeront à l'âge adulte : le chat qui était actif saura attraper une nourriture en bâtonnet vertical, alors que celui qui était passif n'y arrivera pas, n'ayant pas mis en place les coordinations visuo-motrices qui le permettent.

Chez l'être humain, il n'y a pas de période sensible aussi précise que chez le chat, mais nous apprenons aussi à voir et à interpréter ce qui nous entoure. Ainsi chaque être humain crée son propre monde (son *umwelt*).

Avec ses singularités : le même lieu, le même moment, le même mot, le même message... n'a jamais exactement le même sens pour chacun de nous, car chacune de nos histoires est unique et imprègne ces significations.

Mais aussi avec ses universaux, comme la vision en relief : par exemple nous voyons en relief le masque en creux d'un visage humain, en étant incapables de voir un nez en creux, même si nous sommes persuadés que nous voyons l'intérieur du masque (Cf. Fig. 7).

Un objectif essentiel de l'enseignement, comme de la communication des sciences, est parfois de montrer aux apprenants que leur façon habituelle d'interpréter ce qui les entoure ne correspond pas à la réalité telle qu'elle est testable (par exemple, pour la figure 7, vérifier que le masque de droite est bien creux). De façon plus générale, il est de socialiser les *umwelts* toujours singuliers des élèves (langage et concepts partagés, connaissances, valeurs, compétences...).

Je termine cette seconde partie en revenant à la diversité de perception d'une même

forêt, celle du Mont Ventoux, par différents chercheurs qui ont mené des recherches sur cette forêt. Ces résultats sont extraits de la thèse de Mohamed Cheikho (2002)¹².

Est-ce que différents acteurs, en charge de la gestion d'une forêt ou de recherches sur cette forêt (exemple du Mont Ventoux) partagent la même vision de cette forêt ?

La figure 8 illustre que chaque acteur interviewé (pendant au moins 1 heure) n'utilise pas les mêmes références pour parler de la même forêt. La recherche fondamentale domine certains entretiens, avec des spécialisations (telles plantes ou tels animaux, par exemple, selon le champ de recherche de ces acteurs ; ce qu'illustrent des résultats complémentaires à ceux présentés par la figure 8), alors que d'autres s'intéressent plus aux aspects pratiques d'agronomie et de recherches appliquées. Enfin, alors qu'aucun de ces acteurs n'a de formation spécifique dans le champ des sciences humaines et sociales, tous s'y réfèrent et même certains d'entre eux, ceux qui ont le plus de responsabilités, y consacrent plus de la moitié des entretiens. Cette recherche analysait les difficultés de mise en œuvre d'une réelle pluridisciplinarité dans le programme de recherche auquel participaient tous les acteurs interrogés. Elle a montré (1) que cette pluridisciplinarité n'était le plus souvent qu'un discours de façade, chaque acteur étant surtout préoccupé par son approche disciplinaire sans souci pour l'ensemble de la forêt, et (2) que les préoccupations les plus pluri, inter et transdisciplinaires étaient portées par des responsables, qui établissaient le plus de liens entre les dimensions environnementales, sociales, économiques et politiques.

Il est à espérer que, depuis cette recherche, les travaux sur les forêts, en particulier au sein de l'association Forêt Méditerranéenne et de l'Association Internationale Forêts Méditerranéennes (AIFM), conjuguent plus la multiplicité des approches qui sont au cœur du développement durable (Cf. Fig. 2).

Valeurs (le modèle KVP), éthiques environnementales

Le paragraphe qui précède montre que les connaissances d'un acteur sur la forêt reflètent largement ses pratiques sociales sur la

Intervieweur	Statut	Spécialité et / ou fonction	Lieu de travail
F	Chef du Projet Réserve Biologique du Mont Ventoux	Ingénieur maître environnement et qualité de vie.	EMAE syndicat local d'aménagement du Mont Ventoux, Carpentras (UNESCO, Programme MATH)
M	Directeur de l'unité de recherche, directeur de recherche	Ingénieur forestier (amélioration des arbres forestiers)	INRA d'Avignon, unité de recherche forêts
X	Résponsable section technique	Ingénieur forestier	ONF d'Avignon, Section technique
D	Directeur recherche INRA	Ingénieur forestier spécialisation de la connaissance des arbres forestiers. Responsable d'un projet pluridisciplinaire récent sur le Mont Ventoux	INRA d'Avignon, Unité de recherche forêts
L (B-R)	D- Chef de service à l'ONF (directeur départemental) R- Adjoint du Directeur départemental ONF	Ingénieurs forestiers	ONF d'Avignon
H	Directeur recherche CNRS	Herpétologie	CNRS La Rochelle
Q (B-Q)	Q- Professeur Université B- Directeur recherche CNRS	Ecologie végétale Ecologie végétale	Faculté Sciences, Université de Marseille, Laboratoire d'écologie méditerranéenne
R	Directeur recherche INRA	Bactériologie	INRA d'Avignon
P	Directeur recherche INRA	Écologie / Écosp. programmes pluridisciplinaires du Mont Ventoux sur les années 70	INRA d'Avignon, unité de recherche forêts
G	Directeur recherche INRA	Écologie / Écosp. station, élu conseil municipal	INRA d'Avignon, département de recherche forêts, station de Malzac
J	Directeur de recherche au CNRS, enseignant chercheur à l'Université	Omnologie	CNRS, université de Montpellier

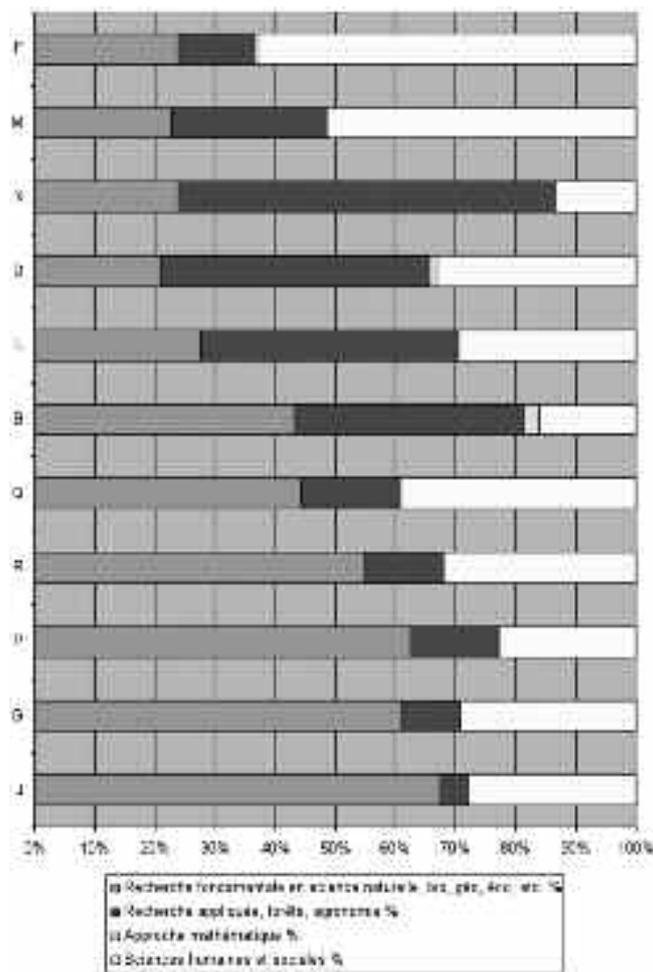


Fig. 8 : Entretiens avec les principaux chercheurs sur la forêt du Ventoux (Cheikho 2002)

forêt. Je voudrais à présent insister sur les interactions possibles entre connaissances et valeurs. Je commencerai par définir le modèle KVP, qui sous-tend nos recherches depuis plus de 10 ans¹³ (il sous-tend aussi les recherches menées dans 19 pays dans le cadre du projet Biohead-Citizen que j'ai coordonné de 2004 à 2008 : voir plus bas).

En effet, les connaissances (K pour *Knowledge*) et les pratiques sociales (P) sont aussi sous-tendues par des valeurs (V) qui sont souvent implicites. Le modèle KVP propose d'analyser les conceptions comme des possibles interactions entre les trois pôles K, V et P (Cf. Fig. 9).

Ces interactions KVP peuvent être analysées à tous les niveaux de la transposition didactique (Cf. Fig. 10) : depuis les publications scientifiques primaires jusqu'aux savoirs enseignés ou vulgarisés, en passant par différents stades de vulgarisation, ou de choix des contenus à enseigner (programmes

scolaires) et de la transformation de ces contenus à destination des élèves ou étudiants (manuels scolaires, autres aides d'enseignement, cours des enseignants).

A chacun de ces stades peuvent être identifiés des acteurs dont les conceptions sont analysables en termes d'interactions possibles entre les trois pôles K, V et P.

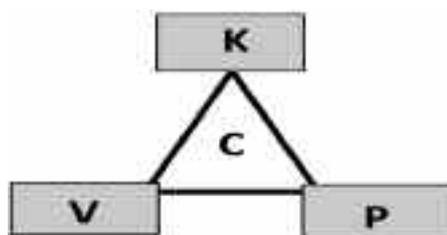


Fig. 9 : Les conceptions C peuvent être analysées comme de possibles interactions entre connaissances scientifiques (K), valeurs (V) et pratiques sociales (P)

13 - Clément P., 1998 - La Biologie et sa Didactique. Dix ans de recherches. *Aster*, 27, p.57-93
 Clément P., 2004 - Science et idéologie : exemples en didactique et épistémologie de la biologie. Actes du Colloque Sciences, médias et société. ENS-LSH, p.53-69 <http://sciences-medias.ens-lsh.fr>
 Clément P., 2006 - Didactic transposition and the KVP model : conceptions as interactions between scientific knowledge, values and social practices. Proceedings of ESERA Summer School 2006, IEC, Braga (Portugal), p.9-18.
 Clément P., 2010 - Conceptions, représentations sociales et modèle KVP. *Skholé* (Univ. De Provence, IUFM), 16, p. 55-70.

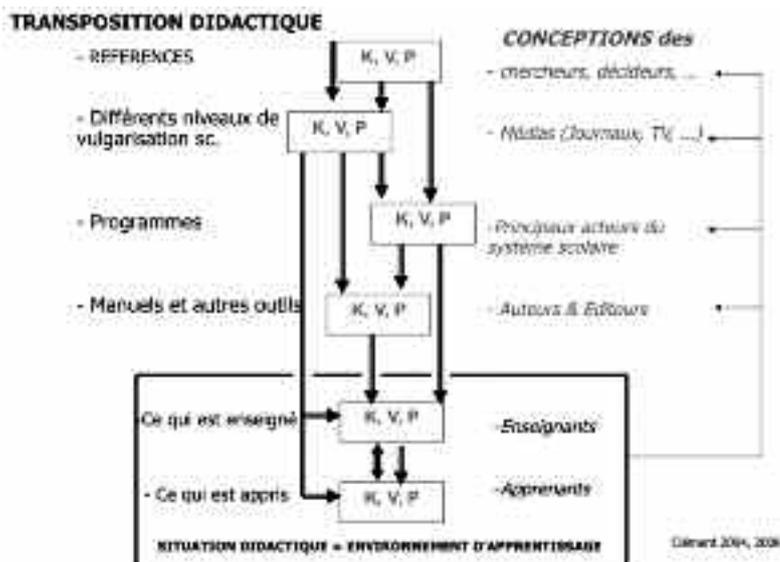
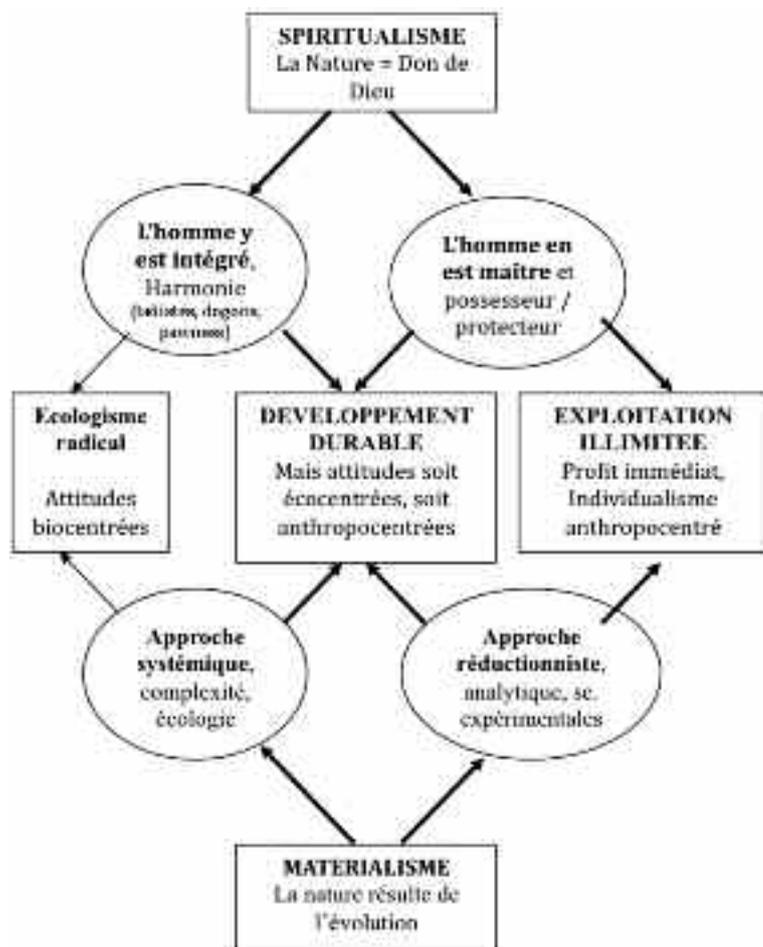


Fig. 10 (ci-dessus) :
Les différents stades de la transposition didactique dans un contexte d'éducation formelle (d'après Clément 2010).



Dans le cas de formations professionnelles sur la forêt, ou de situations d'éducation non formelle, les acteurs et stades de la transposition didactique ne sont pas les mêmes que dans la figure 10, qui reste donc à adapter dans cette perspective.

Ces situations relèvent cependant de l'EDD (Education au développement durable) qui présente les grandes caractéristiques suivantes :

- plusieurs disciplines scientifiques, approche interdisciplinaire, systémique, holistique ;
- des connaissances scientifiques pas toujours stabilisées (réchauffement climatique, couche d'ozone...) : débats entre experts, référence au principe de précaution...

- l'EDD a comme objectif de susciter des actions, des pratiques sociales (P) actuelles (des élèves) et futures (les élèves sont de futurs citoyens adultes) ;

- ces actions supposent des attitudes qui s'appuient sur des valeurs citoyennes (V) : respect, solidarité, responsabilité.

La nature des valeurs (et des pratiques qu'elles sous-tendent) mérite d'être discutée plus précisément. On peut distinguer plusieurs niveaux de valeurs :

- valeurs de la science (respect des preuves, honnêteté, modestie et esprit critique). Valeurs de l'interdisciplinarité, et de la vigilance épistémologique ;

- valeurs de l'expertise, qui ne se fonde pas que sur des connaissances scientifiques, mais aussi sur les opinions des experts, ce qui oblige à redoubler de vigilance !

- valeurs pédagogiques / didactiques de l'EDD : confiance dans la capacité des élèves (ou autres interlocuteurs) à débattre, argumenter, écouter et comprendre des opinions différentes, construire activement leurs compétences ;

- valeurs citoyennes : le « durable » impose une solidarité avec les générations futures.

Cependant, si certaines valeurs de l'EDD sont ou peuvent devenir consensuelles, d'autres renvoient à une diversité de rapports à l'environnement et au développement durable, à diverses éthiques environnementales.

Fig. 11 (ci-contre) :
Le développement durable à l'intersection de plusieurs valeurs et éthiques environnementales (d'après Clément 2004)¹⁴

La figure 11 en présente une synthèse originale. Elle illustre que la force du Développement durable (DD) est de se situer à l'intersection de divers types de rapport à la nature, et de s'opposer à deux types de positions extrêmes :

- l'exploitation illimitée des ressources naturelles, sans aucun souci des générations futures ni de la durabilité des ressources de notre planète. Cette attitude est encore malheureusement très présente, par la recherche du profit immédiat et un mépris des valeurs fondamentales du DD ;

- l'écologisme radical qui, à l'opposé, donne des droits excessifs à tout ce qui est vivant et s'insurge plus quand meurt un oiseau que quand meurt un chasseur ou un pêcheur !

Mais cette même figure suggère aussi de possibles difficultés, car le DD peut être un consensus de façade qui masque de profondes différences entre ses défenseurs, différences qui risquent d'émerger lors de la mise en œuvre de l'EDD. Nous allons voir dans une dernière partie à quel point ces éthiques environnementales diffèrent d'un pays à un autre, en analysant les conceptions d'enseignants dans neuf pays méditerranéens.

Conceptions, représentations sociales, systèmes de conceptions sur la nature et l'environnement dans neuf pays méditerranéens

Les résultats présentés ici proviennent d'une recherche collective que j'ai coordonnée avec G. Carvalho (Portugal) et F. Bogner (Allemagne), et qui a impliqué 18 pays de 2004 à 2008 : BIOHEAD – Citizen (*Biology, Health and Environmental Education for better Citizenship*) 2004 – 2008.

Cette recherche a été financée par la Communauté européenne (STREP du FP6, Priorité 7). Elle se prolonge actuellement, sans financement, pour s'élargir à d'autres pays.

Ces résultats sont en cours de publication (CARAVITA, CLÉMENT *et al.*, 2011). Ils concernent neuf pays méditerranéens, dans lesquels, dans chaque pays, entre 300 et 750 enseignants ont été interrogés sur les six thèmes du projet BIOHEAD-Citizen, l'un d'eux étant leur rapport à la nature et à l'en-

vironnement. Dans chaque pays, un tiers des personnes interrogées enseignaient dans le Primaire, un tiers dans le Secondaire en Biologie et un tiers dans le Secondaire en Lettres (la langue du pays). Pour chacun de ces trois échantillons, la moitié des enseignants étaient en fin de formation, tandis que ceux de l'autre moitié étaient en service.

Le questionnaire utilisé a été élaboré puis validé pendant les deux premières années du projet¹⁵. Il comporte 27 questions sur les rapports à la nature et l'environnement. Je ne présente ici qu'une petite partie des résultats.

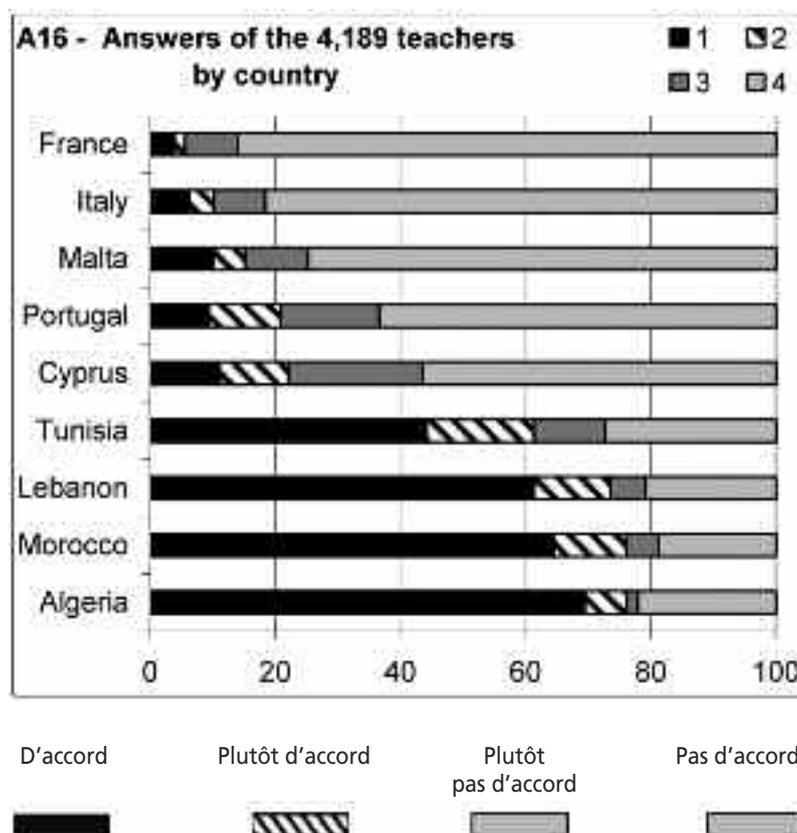
Par exemple les réponses à la question A16 (Cf. Fig. 12) différencient très nettement les pays méditerranéens : quand plus de 80% des enseignants français ou italiens sont en désaccord total avec la proposition « *Notre planète a des ressources naturelles illimitées* », cette proportion n'est que de 20% en Algérie, au Maroc ou au Liban. Plus des deux tiers d'enseignants des pays du Nord de la Méditerranée sont tout à fait ou plutôt en désaccord avec cette proposition, alors que cette proportion est de 23 à 38% pour les enseignants tunisiens, libanais, marocains ou algériens.

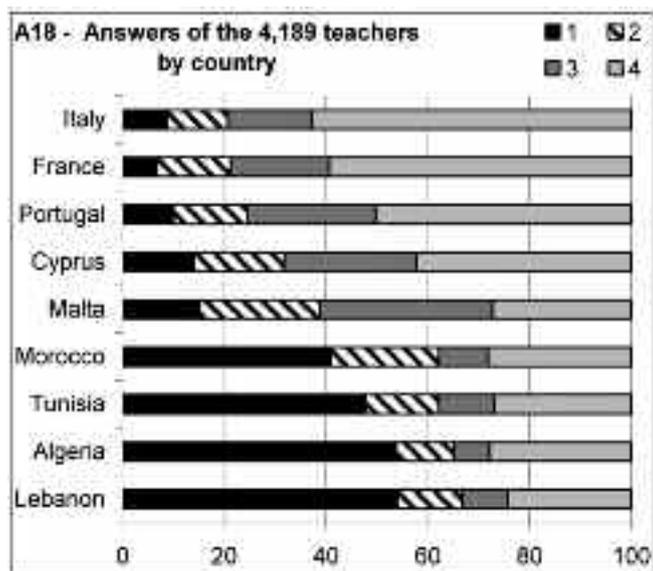
Le même type de différences entre pays s'observe dans les réponses des enseignants

14 - Clément P., 2004b - Construction des umwelts et philosophies de la nature. Soc. Linéenne Lyon (co-éd. Univ. Catholique Lyon : Fac. Sc. & Fac. Philo : J.M.Exbrayat & P.Moreau, *L'homme méditerranéen et son environnement*), p.93-106

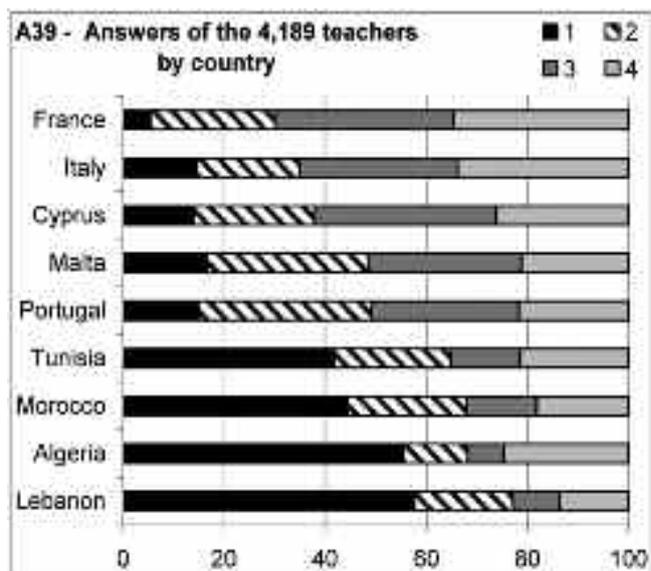
15 - Clément P. & Carvalho G. (2007). Biology, Health and Environmental Education for better Citizenship: teachers' conceptions and textbook analysis in 19 countries. Proceedings WCCES XIII (World Council of Comparative Education Societies), Sarajevo, CD-Rom, 15 pp

Fig. 12 : Réponses de 4189 enseignants (de 9 pays méditerranéens) à la question A16 : "Notre planète a des ressources naturelles illimitées"





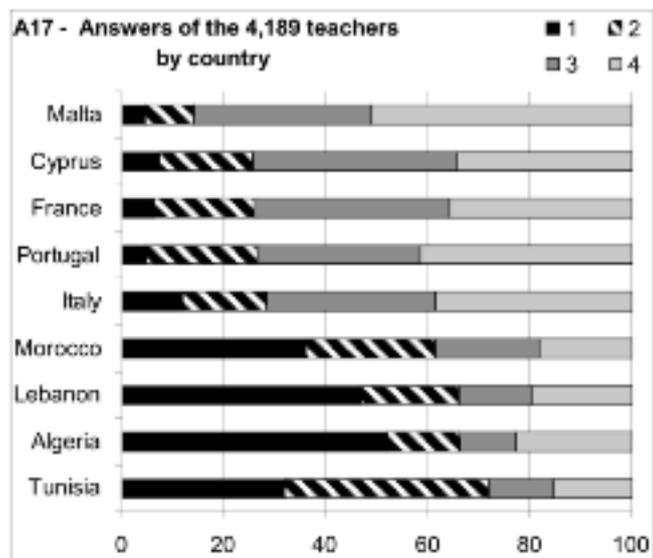
Réponses de 4189 enseignants (de 9 pays méditerranéens) à la question A18 :
« Les êtres humains sont plus importants que les autres »



Réponses de 4189 enseignants (de 9 pays méditerranéens) à la question A39 :
« Les plantes génétiquement modifiées sont bonnes pour l'environnement parce que leur culture réduira l'usage des pesticides chimiques (par exemple : insecticides, herbicides) »

D'accord Plutôt d'accord Plutôt pas d'accord Pas d'accord

■ ▨ ▩ □



Réponses de 4189 enseignants (de 9 pays méditerranéens) à la question A17 : « La société continuera à résoudre les problèmes environnementaux, même les plus gros »

Fig. 13 : Réponses par pays aux questions A18, A39 et A17

aux questions A17 : « La société continuera à résoudre les problèmes environnementaux, même les plus gros » ; A18 : « Les êtres humains sont plus importants que les autres êtres vivants » ; et A39 : « Les plantes génétiquement modifiées sont bonnes pour l'environnement parce que leur culture réduira l'usage des pesticides chimiques (par exemple : insecticides, herbicides) » (Cf. Fig. 13).

A travers leurs réponses à ces questions, les enseignants que nous avons interrogés dans des pays méditerranéens arabes semblent moins sensibilisés que leurs collègues européens au problème des limites des ressources naturelles et expriment des positions plus anthropocentriques. Celles-ci peuvent se comprendre car leur premier problème est celui de la lutte contre la pauvreté et pour le développement économique. Ils sont aussi plus favorables aux OGM (organismes génétiquement modifiés) comme solution aux gros problèmes qu'ils rencontrent avec les dangers des pesticides, et de façon générale plus confiants dans le progrès des sciences et des techniques, comme l'ont aussi montré d'autres enquêtes.

	au niveau individuel	au niveau collectif
Conceptions situées	Le contenu de la réponse d'une personne à une question précise dans une situation précise	Le contenu convergent des réponses de plusieurs personnes placées dans la même situation précise
Conceptions	Les cohérences dégagées par le chercheur à partir des réponses d'une personne placée dans plusieurs situations relatives à un thème donné (conceptions individuelles sur ce thème)	Les cohérences dégagées par le chercheur à partir des conceptions individuelles sur un même thème, identifiées chez plusieurs personnes (groupe social) (conceptions collectives = représentations collectives, ou représentations sociales)
Systèmes de conceptions	Ensemble de conceptions (représentations sociales) corrélées entre elles. Elles peuvent aussi être liées à des caractéristiques individuelles comme les opinions sur le plan social, religieux ou politique	

Tab. III :
Définitions : conceptions situées, conceptions, représentations sociales et systèmes de conceptions

Il est bien connu que la réponse d'une personne à une question précise peut largement dépendre de la formulation de la question, et n'exprimer que ce que j'ai appelé une « conception située », influencée par la situation. Pour analyser les conceptions d'une personne sur un thème donné, il faut donc la mettre dans différentes situations, par exemple face à plusieurs questions différentes portant sur le même thème. C'est ce que nous avons fait, et qui est par exemple illustré par les questions des figures 12 et 13. Nous pouvons en déduire que les conceptions sur l'environnement des enseignants des pays sud-méditerranéens sont plus anthropocentrées que celles de leurs collègues des pays du nord de la Méditerranée, qui sont elles-mêmes plus écolocentrées.

De plus, lorsque des conceptions sont largement partagées par un groupe social, elles correspondent à des représentations collectives, ou représentations sociales (Cf. Tab. III, CLÉMENT 2010).

Enfin, nos résultats montrent aussi, par des analyses multivariées de co-inertie, une forte corrélation entre les conceptions anthropocentrées des enseignants du Sud et Est de la Méditerranée et :

- d'une part leurs opinions religieuses (forte croyance en Dieu, importante pratique de la religion), économiques (plus favorables au privé) et politiques (moins laïques, plus pour un pouvoir central fort) ;

- d'autre part leurs conceptions sur d'autres thèmes, par exemple sur des questions

relatives au déterminisme génétique, avec des justifications biologiques d'inégalités entre hommes et femmes, ou entre groupes ethniques, ou encore une forte intolérance vis-à-vis de l'homosexualité.

L'ensemble de ces résultats met donc en évidence des « systèmes de conceptions » (Cf. Tab. III) qui eux-mêmes peuvent être mis en relation avec le niveau économique, social ou culturel de chaque pays.

Au total émerge donc une complexité difficile à prendre en compte par les enseignants, formateurs ou médiateurs de connaissances sur l'environnement.

Vouloir transférer ou communiquer des connaissances sur les forêts, incluant les dimensions écologiques, sociales et économiques qui privilégient la durabilité, peut se heurter à des conceptions anthropocentrées enracinées dans des valeurs et pratiques (religieuses, sociales, économiques, éthiques) elles-mêmes liées à des contextes économiques et politiques...

Cela ne doit pas nous décourager pour autant, et plutôt nous armer face à de possibles désillusions. Prendre la mesure de la complexité des problèmes est le préalable indispensable pour tenter de les résoudre !

Pierre CLEMENT
Didactique
de la biologie et de
l'environnement,
Université Lyon 1,
Coordinateur
du projet Biohead-
Citizen
(Biology, Health and
Environmental
Education for better
Citizenship)
Pierre.Clement@
univ-lyon1.fr

P.C.

Résumé

Le didacticien est d'abord un peu épistémologue : quelles connaissances s'agit-il de transmettre à propos des forêts méditerranéennes ? Elaborées par qui, et pour qui ? Comment s'inscrire dans une démarche holistique, systémique, dans le contexte de l'Education au Développement Durable (EDD) ? L'EDD est loin de se limiter à la transmission de connaissances (pas toujours stabilisées) : elle s'intéresse aussi aux attitudes, aux valeurs et aux pratiques sociales des personnes auxquelles elle s'adresse. « *Il convient d'éduquer au choix et non d'enseigner des choix* ». Les compétences visées par l'EDD se déclinent en fonction des cinq piliers de l'éducation repris par l'UNESCO : apprendre à savoir, à faire, à être, à vivre ensemble, à se transformer soi-même ainsi que la société. Tous ces points sont abordés dans cet article et illustrés d'exemples précis.

Summary

Science teaching and educating for sustainable development: process and challenges

An educator is first a bit of an epistemologist: what knowledge should be transmitted about Mediterranean forests? Assembled by who and for whom? How can it be fitted in to a holistic, systemic undertaking in the context of educating for sustainable development (EDD)? EDD goes far beyond the transmission of knowledge (not always unvarying): it also focuses on the attitudes, values and social practices of the people it is addressing. "*It is a matter of education in making choices and not teaching which choices.*" The competency aimed at with EDD can be broken down into the five pillars of education as enshrined by UNESCO: learning to know, to do, to be, to live together, to transform oneself along with society. All these aspects are tackled in this paper and are illustrated with specific examples

Riassunto

Didattica delle scienze e educazione allo sviluppo sostenibile : processo e poste

Il didattiziano è da prima un poco epistemologista : quale conoscenza si tratta di trasmettere a proposito delle foreste mediterranee ? Elaborate da chi e per chi ? Come iscriversi in un procedimento olistico, sistemica, nel contesto dell'educazione allo sviluppo sostenibile ? L'educazione allo sviluppo sostenibile è lontano dal limitarsi alla trasmissione di conoscenze (non sempre stabilizzate) : si interessa anche agli atteggiamenti, ai valori e alle pratiche sociali delle persone ai quali si rivolge. « *Conviene di educare alla scelta e no di insegnare scelte* ». Le competenze mirate dall'educazione allo sviluppo sostenibile si declinano in funzione delle cinque colonne dell'educazione riprese dall'UNESCO : imparare a sapere, a fare, a essere, a vivere insieme, a trasformare se stesso come la società. Tutti questi punti sono abordati in questo articolo e illustrati da esempi precisi.

Le Réseau mixte technologique AFORCE : un outil au service du transfert

par Céline PERRIER

Le réseau mixte technologique AFORCE est un réseau national exclusivement consacré au transfert des connaissances vers les gestionnaires forestiers en vue d'une meilleure adaptation des forêts au changement climatique.

Dans cet article, l'auteur fait le bilan de deux ans de fonctionnement du réseau. Si le réseau a joué avec succès son rôle de déclencheur et de facilitateur dans le processus de transfert, il a montré aussi que l'appropriation des connaissances demande un certain temps, incompressible, pour une assimilation efficace.

Créé à l'automne 2008, le RMT AFORCE, réseau mixte technologique consacré à l'adaptation des forêts au changement climatique, a pour objectif d'apporter les éléments de connaissance nécessaires aux gestionnaires forestiers pour anticiper le changement climatique. Il rassemble douze partenaires du milieu forestier appartenant à la recherche, au développement, à la gestion et à l'enseignement. Les actions qu'il met en œuvre ont pour vocation première d'accélérer le transfert entre la recherche et la gestion.

Accélérer le transfert pour anticiper le changement climatique

L'accroissement prévu de l'effet de serre et les changements climatiques annoncés soulèvent de nombreuses questions parmi les forestiers. Les forêts pourront-elles supporter ces évolutions ? Comment seront-elles affectées ? Quelles actions doit-on favoriser en premier pour minimiser les éventuels dépérissements ? Compte tenu de la durée de révolution des principales essences forestières, il est nécessaire de s'interroger dès à présent sur les espèces à privilégier, car elles devront subir d'ici 50 ans les effets d'un climat modifié.

Les outils disponibles actuellement ne répondent pas directement à ces nouvelles interrogations. La recherche a commencé à travailler sur ces questions dès les premiers effets constatés (dépérissements, évolution de l'aire de certains parasites...) mais la production de résultats demande du temps. De plus, l'information n'est pas toujours directement utilisable et en adéquation avec les besoins immédiats des praticiens : elle doit encore être transformée, traduite, vulgarisée et diffusée pour lui devenir accessible. Ainsi, les délais sont généralement assez longs avant une mise à disposition d'outils pour le gestionnaire répondant à chaque question posée.

Le contexte du changement climatique est particulier, car les hypothèques pesant sur la forêt française sont lourdes de conséquences. Il convient donc d'accélérer la production de connaissances et leur mise à disposition pour les praticiens comme pour les décideurs. Le RMT intervient à ce stade en s'efforçant de faire le lien entre les actions dispersées autour des cinq thèmes techniques qu'il a retenus : stations forestières, vulnérabilité des peuplements, ressources génétiques, croissance-sylviculture et économie. Il se concentre en priorité sur les résultats déjà transférables, pour les valoriser et apporter des premiers outils aux gestionnaires. Son action peut aboutir à la réalisation de produits bruts (synthèses, expertises, expérimentations) ou à celle de produits plus élaborés (formations, documents de gestion...).

Les étapes du transfert

Le transfert peut être défini comme un « processus qui englobe toutes les étapes entre la création de nouvelles connaissances, la diffusion et l'absorption de ces dernières pour aboutir à des résultats avantageux qui répondent à des besoins » (adapté de PARENT, 2008). Son succès dépend du lien entre la production de connaissances et les besoins des praticiens.

Le champ d'action du RMT AFORCE couvre chacune de ces étapes (Cf. Fig. 1). Il est impliqué différemment selon l'état d'avancement du processus de transfert au sein de

ses thèmes de travail. Il se concentre sur les points de blocage et accompagne le processus jusqu'à son aboutissement complet.

Pour que le transfert soit réussi, le réseau doit s'assurer que, quelle que soit l'étape du processus où il intervient, son action sera prolongée au-delà du projet pour atteindre le stade ultime du transfert : l'utilisation des produits réalisés.

Dans le contexte du changement climatique, ce point est d'autant plus crucial que l'incertitude sur l'évolution du climat ne permet pas de fournir des réponses absolues aux questions posées par les gestionnaires. Ainsi, les informations transférées sont, avant tout, des outils d'aide à la décision. Le gestionnaire doit se les approprier, les mettre en œuvre et construire ensuite ses propres connaissances.

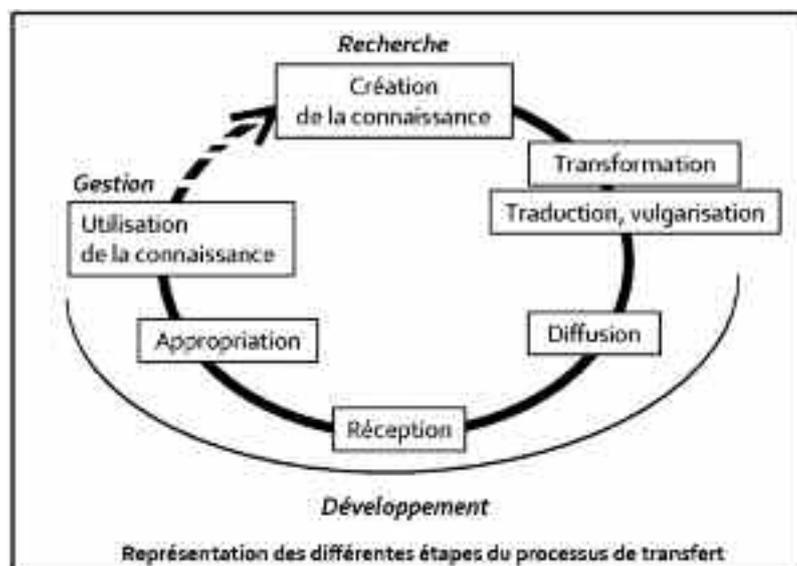
Structuration en réseau : un accélérateur de transfert

Le processus de transfert implique successivement de nombreux acteurs. Sa réussite dépend de la diversité et de la multiplicité de ces acteurs, et d'une bonne communication entre chacun d'eux.

Le RMT AFORCE a été créé de manière à réunir les différents maillons de la chaîne du transfert : chercheurs, développeurs, gestionnaires, enseignants et formateurs. La mise en réseau de ces partenaires facilite la circulation de l'information et le regroupement des connaissances. Le RMT AFORCE est aussi enrichi par d'autres réseaux auxquels il s'est associé (Chambres d'agriculture, enseignants...) : c'est un complément important pour la diffusion des connaissances et l'expression des besoins.

Pour favoriser les échanges inter institutionnels et interdisciplinaires au sein du réseau, chacune des thématiques de travail est animée par un « binôme recherche et développement ». Les binômes se réunissent par ailleurs régulièrement pour échanger sur les différentes thématiques. Différents ponts de communication sont ainsi créés grâce à la structuration du réseau elle-même (Cf. Fig. 2). Ce travail en commun permet aux acteurs d'améliorer leur connaissance et leur compréhension mutuelle, et d'apprécier les attentes et contraintes de chacun.

Fig. 1 :
Les différentes étapes
du processus de transfert



En bout de chaîne, l'enseignement tient une place essentielle pour assurer l'utilisation des documents produits. Dans le RMT AFORCE, la présence de l'enseignement technique et de l'enseignement supérieur parmi les partenaires permet l'intégration des connaissances produites dès la formation des futurs gestionnaires. Les résultats du transfert sont alors décalés dans le temps, mais ils sont efficaces. La formation des enseignants doit elle aussi constituer une priorité.

Les moyens mis en œuvre depuis 2008 pour assurer le transfert

Pour s'assurer de la réussite du transfert, le RMT AFORCE a mis en place dès 2008 toute une chaîne d'actions. Il s'efforce, en premier lieu, de mieux connaître le destinataire des connaissances produites et sa demande, pour pouvoir ensuite lui apporter une réponse efficace. Pour cela, le réseau s'est d'abord inspiré des résultats de la consultation des gestionnaires forestiers menée par l'Institut pour le développement forestier en 2007 (RIOU-NIVERT, 2008). Un appel à idées a ensuite été organisé pour compléter l'inventaire des besoins. Des enquêtes sont, depuis, menées régulièrement pour tenter de tenir à jour ce recensement. En parallèle, des travaux ont été mis en œuvre dans le cadre du projet Creafor¹ pour identifier les principaux programmes et projets de recherche existants, afin de repérer d'éventuels résultats transférables.

La transmission des connaissances et leur actualisation est assurée ensuite grâce à l'organisation d'ateliers, à la diffusion d'articles dans les revues forestières et à la mise à disposition d'informations et d'articles sur le site internet du réseau. La diffusion se fait également par le biais d'autres réseaux.

Pour passer du résultat de la recherche à l'outil pour le gestionnaire, des appels à projets sont lancés chaque année. Ils impliquent les utilisateurs finaux des outils, de manière à être sûr que ceux-ci correspondent à leurs attentes et pour en commencer l'appropriation. Les différentes manifestations organisées dans le cadre du réseau sont aussi des occasions de créer de nouvelles collaborations, de favoriser les échanges et l'interconnexion recherche/terrain.

Enfin, l'appropriation des connaissances est assurée par le biais de formations réalisées dans le cadre des projets du réseau. Elles permettent d'assurer l'acquisition des compétences et connaissances et leur mise en pratique effective.

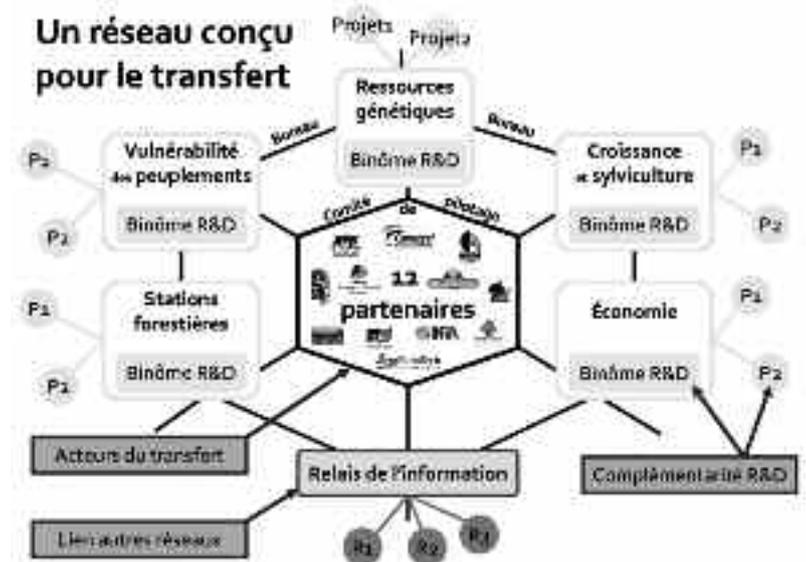
1 - Projet de Coordination des activités de Recherche sur l'Adaptation des FORêts au changement climatique dirigé par le GIP Ecofor, en collaboration avec le RMT AFORCE.

Les difficultés rencontrées, les limites du transfert

Après deux ans d'action, un retour sur la méthode de transfert mise en œuvre dans le cadre du RMT a été nécessaire. Elle a permis de mettre en évidence la difficulté, même en ayant réuni tous les acteurs, d'accélérer de manière conséquente le processus. Le principal enjeu réside dans la nécessité de garder une connexion constante entre évolution des besoins et production de connaissance. Il est, en effet, plus facile de produire une réponse adaptée si le besoin est déjà bien identifié. Quant aux délais nécessaires à la création d'une réponse, ils restent encore longs et semblent difficiles à réduire.

Accélérer le processus de transfert implique aussi d'être en mesure d'identifier, parmi la masse importante d'informations scientifiques disponible, ce qui est transférable. Ce n'est pas toujours chose facile. Cela suppose notamment un suivi régulier de l'évolution des productions scientifiques. Il faut enfin pouvoir apprécier les apports et limites des résultats produits par la recherche.

Fig. 2 : La structuration du Réseau mixte technologique Aforce



Céline PERRIER
Chargée de mission
pour la coordination
du réseau AFORCE
Institut pour le
Développement
Forestier / CNPF
47, rue de Chaillot
75116 Paris
Tél. : 01 47 20 68 15
Courriel :
celine.perrier@cnpf.fr

Conclusion

Le RMT AFORCE a joué ces deux dernières années un rôle de déclencheur et de facilitateur du processus de transfert. Si les projets initiés, faute de temps et de moyens, ne sont pas tous encore arrivés à leur terme, le réseau a au moins contribué à enclencher ou poursuivre, selon les thèmes, la démarche de transfert. Il a aussi participé à fédérer les acteurs en assurant la cohésion entre ses partenaires et en renforçant les liens entre organismes. Ainsi, son action n'a pas seulement permis de faire avancer la réflexion sur l'adaptation des forêts face au changement climatique, elle a aussi, plus largement, fait avancer les méthodes de travail à mettre en œuvre pour améliorer le processus de transfert. L'appréciation des retombées des actions du RMT passe donc en premier par la mesure de l'appropriation des outils produits.

La communication est apparue comme un élément clé dans la réussite du transfert. C'est pourquoi, le RMT AFORCE met aujourd'hui l'accent sur la diffusion de l'information et des résultats par des canaux variés. Le réseau tente également de rendre systématiques les échanges entre la communauté scientifique et les gestionnaires, il s'efforce par ailleurs de faire toujours mieux remonter les besoins.

Enfin, l'expérience tend à montrer qu'améliorer le transfert n'est pas forcément compa-

tible avec un raccourcissement des délais. Il est parfois nécessaire de laisser du temps à certains résultats pour se stabiliser avant d'être transférés. L'appropriation demande aussi un temps d'assimilation. Certaines étapes essentielles ne doivent donc pas être sautées, si on ne veut pas risquer de déformer le message transmis.

C.P.

Références

- PARENT R., SAINT-JACQUES D., et BELIVEAU J., 2008. Knowledge Transfer: An Emerging Classification System. In El-Sayed Abou-Zeid (dir.), Knowledge Management and Business Strategies: Theoretical Frameworks and Empirical Research (p. 90-107). Hershey, PA: IGI Global.
- RIOU-NIVERT Ph., 2008a. La conduite des peuplements (fiche n°1). *Forêt-Entreprise* n°180, p 16-21.
- RIOU-NIVERT Ph., 2008b. Le matériel végétal (fiche n°2). *Forêt-Entreprise* n°180, p 22-24.
- RIOU-NIVERT Ph., 2008c. Les stations forestières (fiche n°3). *Forêt-Entreprise* n°180, p 25-27.
- RIOU-NIVERT Ph., 2008d. La gestion des risques (fiche n°4). *Forêt-Entreprise* n°182, p 19-24.
- RIOU-NIVERT Ph., 2008e. La production et la récolte (fiche n°5). *Forêt-Entreprise* n°182, p 25-29.
- À consulter pour plus de précisions :**
- PERRIER C., 2009. AFORCE, un réseau mixte technologique sur l'adaptation des forêts au changement climatique. *Forêt-Entreprise* n°186, p 59-63.
- PERRIER C., 2011. Des appels à projets pour susciter de nouveaux partenariats et accélérer le transfert. *Forêt-Entreprise* n°196, p 13-16.
- PICARD O., 2011. Le RMT AFORCE, une démarche innovante de partenariat entre les forestiers. *Forêt-Entreprise* n°196, p 12.
- SITE INTERNET du réseau AFORCE : <http://www.foret-priveefrancaise.com/AFORCE>

Résumé

L'accroissement prévu de l'effet de serre et les changements climatiques annoncés soulèvent de nombreuses questions parmi les forestiers. Les gestionnaires s'interrogent notamment sur la façon de rendre les forêts plus aptes à supporter ces nouvelles conditions. Pour anticiper ces changements, les gestionnaires forestiers ont fait remonter à la recherche leurs interrogations. Cette démarche a permis de mettre en évidence : la nécessité d'une mise à jour fréquente des connaissances, des besoins en recommandations claires, un transfert lent, un décalage entre chercheurs et gestionnaires et des actions dispersées, peu coordonnées. Dans ce contexte et pour faire face à ces difficultés, il est apparu nécessaire de pouvoir créer un lieu d'échange et de concertation, qui contribue à coordonner les actions en faveur de l'adaptation des forêts au changement climatique et qui permette d'améliorer les connaissances sur le sujet, d'accélérer leur diffusion et de fournir aux gestionnaires des outils opérationnels d'aide à la décision. Les forestiers se sont donc associés pour créer un réseau qui regroupe tous les acteurs impliqués autour de cette thématique : le RMT AFORCE.

Summary

The mixed technologic network Aforce (Adaptation of forests to climate change)

The foreseen increase of greenhouse gases and associated climate change raise many questions among foresters. Particularly, managers wonder about how to make forests more likely to support these new conditions. To anticipate these changes, forest managers have forwarded their queries to the research. This enabled to highlight: the need of frequent knowledge update, of clear guidelines, a slow transfer, a gap between scientists and managers and scattered actions, uncoordinated. In this context, and to face these difficulties, it became necessary to create a forum for exchange and dialogue, which helps to coordinate the actions in favour of the forest adaptation to climate change and to improve related knowledge, to accelerate their dissemination and to provide decision-support tools for managers of natural areas. Foresters have therefore joined forces to create a network of all the key stakeholders involved around this theme: RMT AFORCE.

Exemple de méthode de transfert et de communication des connaissances

Des recommandations jusqu'à leur mise en œuvre concrète

La certification européenne des compétences des entrepreneurs de travaux forestiers

par Christian SALVIGNOL

A travers l'exemple du projet de coopération européen ConCert, dont l'objectif est la certification des compétences des entrepreneurs forestiers, l'auteur nous décrit comment l'on passe des connaissances à la rédaction d'un guide de recommandations pratiques et à un programme de formation certifié, qui au final permettra aux entrepreneurs d'appliquer les résultats sur le terrain. Un exemple de transfert réussi.

Première étape : les recommandations

2007, à Berlin, sous l'égide du Comité mixte FAO/UNECE/BIT, entrepreneurs de travaux forestiers, propriétaires forestiers et industriels décident de rédiger un Guide de Bonnes Pratiques destiné aux entrepreneurs de travaux forestiers. L'objectif est de produire des recommandations favorisant la bonne gestion des entreprises de travaux forestiers en Europe.

Décembre 2009, à Bruxelles, *Le Guide des Bonnes Pratiques* est présenté en public. C'est une réussite. Toutes les recommandations attendues y figurent. Nul doute que tout entrepreneur de travaux forestiers qui les mettrait en pratique aurait toutes chances d'élever son niveau de compétences pour la plus grande satisfaction de ses clients.

Hélas, on le sait, les recommandations de séminaires où les innovations n'ont d'intérêt que si elles sont mises en œuvre de façon concrète. A défaut, elles restent sur une étagère, dans un placard.



Le Centre forestier est présent à Bruxelles lors de la présentation du guide. Il s'active depuis de nombreuses années dans les réseaux forestiers européens et a une solide expérience de la coopération en matière de formation.

En sa qualité de formateur, le Centre forestier considère que ce guide qui vient d'être présenté ne peut être qu'une étape. L'amélioration des compétences ne peut résulter de la seule lecture d'un guide, mais de la formation du public cible.



Le Centre forestier indique donc aux participants à la réunion de Bruxelles que la formation des entrepreneurs de travaux forestiers en Europe doit être un objectif, en s'inspirant du contenu de ce guide des bonnes pratiques.

Applaudissements, c'est-à-dire « *on est d'accord avec vous* » !

Deuxième étape : l'initiative

Décembre 2009, assuré du soutien des principaux acteurs du secteur forestier, le Centre forestier prend l'initiative d'un programme de coopération qui sera présenté à la Commission européenne pour solliciter un financement. Il s'agit du projet ConCert.

M. Leonardo da Vinci, « un ami de longue date », devrait en effet pouvoir financer le projet !

Troisième étape : le montage du projet

Le Centre forestier réunit quatre partenaires. Le nombre des partenaires est limité pour une meilleure gestion du projet, mais chaque partenaire a derrière lui des réseaux européens (entrepreneurs de travaux forestiers, centres de formation) qui seront utiles pour le test des produits en cours de réalisation et qui favoriseront l'utilisation des résultats, une fois le projet terminé.

Le Centre forestier choisit en outre de former un comité consultatif composé d'organisations européennes et nationales intéressées qui suivra les opérations et qui formulera son avis au cours du programme. Avantage : ce comité apporte une forme de caution au projet, ce qui est considérable aux yeux du financeur et pour les utilisateurs finaux.

Février 2009, le projet ainsi monté est écrit avec les partenaires. L'expérience montre qu'un projet utile, bien imaginé et bien construit s'écrit facilement. Il a de surcroît toutes chances d'aboutir.

Ce n'est pas rien !

Les photos sont de C. Salvignol / Centre Forestier

Quatrième étape : la réalisation du projet

Juillet 2009, la nouvelle tombe : la Commission européenne a retenu le projet qui est classé 7^e sur 51. Les partenaires sont ravis.

Il y a de quoi, car la phase préalable d'investissement dans le montage du projet représente un important travail.

Le projet débute en octobre 2009.

Le travail est réparti entre tous les partenaires. Chacun a en charge la réalisation totale d'une partie du programme.

Le Centre forestier réunit ses partenaires tous les 3 mois. Les réunions sont préparées avec soin de façon à optimiser les déplacements des partenaires. Tous les sujets sont débattus pour adopter des solutions à la fois conformes au projet et pertinentes. La coopération, c'est de l'intelligence collective. A plusieurs, on est plus intelligent que tout seul !

Le suivi qualité, du point de vue opérationnel, est confié à une chargée de projet du Centre forestier.

Le suivi qualité, du point de vue du respect des objectifs du projet, est assuré par un représentant du réseau européen des entrepreneurs de travaux forestiers, directement intéressé par les résultats. C'est cette personne qui informe le comité consultatif et qui recueille son avis.

Tous les résultats sont testés par des personnes compétentes externes au projet.



Les résultats et leur utilisation

Faire connaître le projet et diffuser les résultats est une action permanente tout au long du projet.

Toutes les occasions sont bonnes : foires forestières, séminaires, réunions, événements (l'Année internationale de la forêt).

La profession, les centres de formation, le comité consultatif, ainsi que les réseaux européens se chargent également de faire prospérer les résultats.

Ces derniers sont présentés en Autriche lors de la 3^e conférence internationale des centres de formation aux métiers de la forêt, en juin 2011, puis le seront lors d'un sémi-

naire international « *Competences for forestry* » en Allemagne, en septembre 2011.

Les résultats sont traduits en français, en anglais et en allemand. Règle absolue pour que les résultats soient utilisés : les traduire.

La diffusion des résultats continuera après le projet, car les partenaires sont tous implantés de façon durable.

Tout faire pour se donner les meilleures chances de l'utilisation des résultats est fondamental. Un projet dont les résultats ne seraient pas utilisés n'a aucune chance d'être financé. De plus, il serait inutile.

Et puis, quelle fierté pour les partenaires de voir le résultat de leur travail utilisé.



En savoir plus
sur Concert :
www.eduforest.eu

Contact :
Christian SALVIGNOL
Directeur du Centre
forestier de la région
Provence-Alpes-Côte
d'Azur
Chairman of the Joint
Network
FAO/UNECE/BIT
to implement SFM
Tél. : 04 90 77 88 00
salvignol@
centre-forestier.org

Quels résultats ?

- Un référentiel des compétences que tout entrepreneur de travaux forestiers doit avoir en Europe.
- Un référentiel de formation.
- Un guide pour les formateurs.
- Un dispositif pour accréditer les centres de formation qui dispenseront la formation et qui délivreront la certification européenne de compétences en fin de formation.

Finalemment

Demain, grâce au transfert d'une innovation (*Le guide des bonnes pratiques* imaginé en 2007), la certification des compétences des entrepreneurs de travaux forestiers en Europe pourra devenir réalité.

Quelques conseils en bref :

- un projet doit répondre à un besoin réel ;
- choisir les partenaires en nombre limité (compétences et réseaux) ;
- viser la dimension européenne ;
- s'associer un partenaire formation ;
- partager l'idée (partenaires et utilisateurs finaux) ;
- impliquer les utilisateurs finaux ;
- faire travailler tous les partenaires ;
- traduire les résultats en plusieurs langues ;
- s'assurer de la capacité du promoteur à diffuser durablement les résultats ;
- agir durablement pour leur utilisation.

C.S.



Visite du site pilote de la forêt domaniale de Nans Alpes-Maritimes (France)

*Action proposée
par l'Office national des forêts dans le cadre
du projet européen For Climadapt*

par Rémi VEYRAND

Le colloque "Observer et s'adapter au changement climatique en forêt méditerranéenne" a été organisé, entre autre, dans le cadre du projet européen For Climadapt. Il a été l'occasion de proposer, avec l'Office national des forêts, autre partenaire français du projet, une tournée forestière consacrée à la visite du site pilote de la forêt de Nans, dans les Alpes-Maritimes. Le compte rendu de cette journée a été rédigé par l'Association Internationale Forêts Méditerranéennes, autre partenaire français du projet.

A la suite du colloque des 30 novembre et 1^{er} décembre à Marseille, l'équipe du projet For Climadapt a proposé aux participants une tournée dans les Alpes-Maritimes pour découvrir, sur le terrain, les premières avancées des actions pilotes prévues par l'Office national des forêts (ONF). Celles-ci sont principalement centrées sur la problématique du dépérissement de peuplements forestiers du fait du changement climatique. Plusieurs secteurs ont été placés sous surveillance, tandis que d'autres servent de témoins, notamment dans l'optique de déterminer les espèces de remplacement et les modalités sylvicoles qui permettront de maintenir les forêts en bonne santé, suite au processus de réchauffement.

1^{er} arrêt : Vue sur la forêt domaniale de Nans depuis le Col de la Faye

La parcelle expérimentale se situe sur le premier relief des Préalpes de Grasse (étage supraméditerranéen), dans le département des Alpes-Maritimes, entre 1000 et 1100 mètres d'altitude (Cf. Photo 1). Elle est homogène et s'étend sur une superficie de 1,8 ha de Cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica*) planté en 1975.

L'objectif est d'expérimenter des modalités de gestion des sapinières en dépérissement en vue de leur renouvellement et, vraisemblable-

1 - INRA : Institut national de la recherche agronomique

ment, de leur remplacement progressif par d'autres espèces, notamment le Cèdre. Le comportement de ce dernier est étudié en versant Sud, où les conditions climatiques sont à peu près équivalentes à ce qu'elles seront sur le versant Nord (où sont actuellement implantées la plupart des sapinières déperissantes) dans 50 à 80 ans du fait du changement climatique (hausse des températures de 3 à 5°C).

Pierre Boyer, agent patrimonial local en charge de la forêt domaniale de Nans gère 441 ha achetés par l'Etat au début du XX^e siècle au titre de la RTM (Restauration des terrains en montagne). A l'époque, le versant était entièrement déboisé du fait d'une forte présence rurale (agriculture, pâturage). La gestion forestière de l'ONF débute dans les années 50 et consiste notamment à planter des arbres pour combler les "vides boisables".

Le choix de *Cedrus atlantica* était expérimental et souvent assez controversé. Les principales cédraies ont été plantées en 1975, puis à la fin des années 90 (84 ha au total). Cela permet d'avoir aujourd'hui une diversité de peuplements notamment au niveau :

- de l'âge des arbres ;
- des conditions d'exposition, de fertilité et de qualité/texture des sols (travail de sous-solage, terrasses, présence d'altérites...);
- des densités de peuplement.

Différents traitements d'éclaircies seront opérés dans le cadre du projet For Climadapt sur la parcelle expérimentale (densité de 1200, 600 et 300 tiges/ha) afin d'évaluer l'effet bénéfique supposé d'une sylviculture à faible densité dans une cédraie. Sur ces différents peuplements (dont celui de la parcelle expérimentale), un suivi de l'indice foliaire, du stress hydrique, de l'état sanitaire et de la croissance des arbres sera aussi développé en lien avec l'INRA¹.

L'autre site pilote est la forêt domaniale de Callong-Mirailles, située sur le plateau de Sault à 1100 mètres d'altitude, dans le département de l'Aude. Il s'agit d'une sapinière en limite d'aire de répartition, dont certaines parcelles présentent des dépérissements ou des difficultés de régénération. Les actions prévues, complémentaires à celles de Nans, consistent à y expérimenter différents traitements d'éclaircies afin de vérifier l'effet bénéfique potentiels d'une sylviculture à faible densité dans une sapinière en situation écologique limite, puis à étudier la régénération naturelle du sapin, introduire des Cèdres de l'Atlas en plein et suivre le renouvellement spontané sans sapin.

D'une manière générale, le Cèdre de l'Atlas semble bien se comporter sur ces sols pauvres et relativement secs (exposition sud, pente de 45 %, sols peu profonds...). Les plus anciens (35 ans) mesurent en moyenne 12 mètres et 25 cm de diamètre.

2^e arrêt : la maison forestière et la piste des Listes

Ici (commune de St-Vallier-de-Thiey) les boisements datent des années 50, suite à la déprise agricole (exode rural).

Les essences principales sont :

- le Pin noir d'Autriche (*Pinus nigra*), qui s'est très bien adapté (branches robustes...) mais sur lequel on constate actuellement une diminution de la densité des houppiers (indice foliaire en baisse) ;

- le Chêne pubescent (*Quercus pubescens*), que l'on exploitait traditionnellement en bois de chauffage et parfois en charpente, qui présente de nombreux rameaux secs et des marques de dépérissement ;

- quelques Cèdres de l'Atlas (*Cedrus atlantica*) ont été plantés à la même époque (Cf. Photo 2) et sont, quant à eux, en excellente santé (28 à 30 mètres). La régénération est vigoureuse, voire "galopante" ;

Photo 1 :

Vue d'ensemble de la forêt domaniale de Nans depuis le col de la Faye et le dispositif expérimental : placette de cèdres plantés en 1975 sur 1,8 ha
Photo DA



– une vingtaine de Douglas (*Pseudotsuga menziesii*) qui se sont, eux aussi, plutôt bien acclimatés, bien qu'ils se trouvent ici en limite d'aire de répartition (mais dans un valon assez frais), mais qui présentent cependant des signes de dépérissement à la cime.

Les avantages du Cèdre

Il s'agit d'un "juste milieu" entre le pin et le sapin : il a une bonne capacité de régénération, tout en laissant la possibilité à d'autres essences de s'installer.

On espère obtenir des billes de 50 à 55 cm de diamètre un peu avant 100 ans, mais on le considère comme valorisable dès 45 ans.

Quarante m³ de bois de grande qualité ont été extraits l'an dernier, bien que ce bois n'ait pu être valorisé à sa juste valeur, parce qu'il était mélangé avec du pin et que le marché local pour cette essence est encore faible car peu connu. On espère à terme qu'il aura un débouché intéressant en bois d'œuvre.

3^e arrêt : population de pins sylvestres "colonisée" par le Sapin pectiné sur le plateau de Séranon

Une partie du versant, en ubac, présente un peuplement de Pin sylvestre en dépérissement dans la partie basse. Il n'est donc valorisé qu'en bois énergie, notamment pour approvisionner l'usine de plaquettes située à proximité (filière courte, 3 à 5 euros la tonne).

Le Conseil général des Alpes-Maritimes a d'une part soutenu la mise en place de réseaux de surveillance et, d'autre part, les communes à travers des aides pour l'exploitation des bois dépérissants (15 euros/m³), ce qui permet d'équilibrer l'exploitation.

La partie basse du versant est une pinède relativement ancienne qui tend à s'éclaircir naturellement, cédant peu à peu la place au Sapin pectiné. Mais la sapinière, qui a tendance à s'installer au-delà de son aire stationnelle, n'y a pas vraiment d'avenir. Les évolutions constatées dans ce type de peuplements laissent présager un dépérissement d'ici quelques décennies. D'autre part, les sapins présentent l'inconvénient de ne laisser la place à aucune autre essence, car ils ne laissent pas filtrer la lumière.

Le projet européen



Présentation

Le programme MED est un programme transnational de coopération territoriale européenne (Interreg IV C), financé par l'Union européenne dans le cadre de sa politique régionale de « Coopération territoriale européenne » de sa nouvelle période de programmation 2007-2013.

L'objectif du projet For Climadapt est d'améliorer les capacités d'adaptation des espaces naturels méditerranéens au changement climatique, en particulier aux risques d'érosion, d'incendies et de dépérissement à travers :

- le développement d'observation et du suivi des changements dans les écosystèmes,
 - le développement d'une nouvelle sylviculture favorisant la biodiversité tout en maintenant la valeur économique,
 - le développement de méthodes de restauration écologique de terrains dégradés,
 - l'information, la sensibilisation de la société et l'amélioration de la gouvernance.
- Il répond à l'axe 2 du programme Med : protection de l'environnement et promotion d'un développement territorial durable.

Partenariat

Conscients des expériences remarquables existantes, un partenariat pertinent et diversifié a été développé progressivement afin de répondre à cet objectif commun. Ce projet triennal réunit un partenariat élargi à six territoires issus de cinq pays :

- le Parc national du Vésuve (Italie) : risques d'érosion et de perte de biodiversité,
 - la Région Ombrie (Italie) : risque croissant d'incendies,
 - l'Office national des forêts (ONF) (France) : dépérissements de peuplements,
 - la Région Nord-Egée (Grèce) : érosion côtière et risque d'incendies,
 - l'Association de protection de l'environnement de Mértola (ADPM) (Portugal) : désertification rurale,
 - le Centre technique forestier de Catalogne (CTFC) (Espagne) : résistance des forêts et changement climatique.
- L'association Forêt Méditerranéenne et l'AIFM (France) complètent le partenariat respectivement pour des actions d'échanges et de communication ; d'animation et de capitalisation du projet.

Actions pilotes

Une première étape consistera à faire un état des lieux des effets des changements climatiques sur les sites pilotes des partenaires, en harmonisant les critères d'observation et de suivi.

L'ONF propose des expérimentations favorisant la variabilité, aux niveaux de la génétique, des essences, de l'âge des arbres (Cf. Article)

Le Parc du Vésuve s'engage à améliorer ses techniques de génie biologique pour maintenir les sols du volcan, puis favoriser le reboisement avec des essences autochtones. Nord-Egée et ADPM se focalisent sur l'amélioration des techniques de reboisement de terrains incendiés ou érodés en favorisant notamment les essences locales.

La Région Ombrie envisage d'appliquer une stratégie de consultation et d'implication des acteurs pour améliorer la stratégie de prévention contre les incendies. L'ADPM souhaite former et sensibiliser d'autres acteurs en milieu rural afin de permettre à la société de s'adapter et en retour de pouvoir anticiper les changements de gestion des espaces naturels.

La contribution de l'association Forêt Méditerranéenne a été d'organiser un colloque international sur la thématique (dont ce numéro rend compte) et de constituer un réseau d'échange en Méditerranée française (institutions, collectivités, organismes de recherche, associations ...) puis d'initier cette démarche associative dans les autres pays partenaires (guide méthodologique).

Projet For Climadapt - www.forclimadapt.eu - email : forclimadapt@epnv.it



Pour suivre l'évolution des peuplements, ont été mis en place :

- un comité scientifique qui se réunit régulièrement ;
- un protocole concerté de suivi des peuplements assorti d'une cartographie précise ;
- des placettes de suivi ;
- une cartographie des secteurs susceptibles de dépérissement.

Le but de ces travaux est d'apporter un conseil opérationnel pour une meilleure adaptation à l'évolution des peuplements, notamment à l'attention des communes qui sont les principaux propriétaires. Pour l'instant, aucune conclusion claire n'est disponible malgré les nombreux éléments de réponse dégagés progressivement par les expérimentations. Toutefois, il paraît évident qu'une politique locale favorisant l'avancée du sapin n'est pas forcément la bienvenue.

Concernant le remplacement du Sapin pectiné, la solution principale envisagée serait donc le Cèdre de l'Atlas, qui n'est sans doute pas une essence-miracle (risque de prolifération incontrôlée...) mais qui semble faire ses preuves. Le Pin noir Laricio de Corse (*Pinus nigra laricio*) pourrait être une alternative, mais il ne pousse habituellement pas sur des sols à dominante calcaire comme ici. Quant aux autres espèces de sapins, elles posent des problèmes sur un plan génétique (risque d'hybridation entre espèces *Abies* spp.) et fourniraient un bois de qualité inférieure.

Il sera difficile de déboucher sur des conclusions fixes d'ici la fin d'un projet aussi court tel que For Climadapt, sachant qu'on étudie des phénomènes multifactoriels qui se manifestent sur le long terme et dont la variabilité à court terme est très importante. Cependant, les tests réalisés permettront d'alimenter les réflexions et d'approfondir les préconisations de gestion.

R.V.

Rémi VEYRAND - AIFM
remi.veyrand@aifm.org

Photo 2 (en haut) :

Peuplement de cèdres matures sur la Piste des Listes (Commune de St-Vallier-de-Thiey)

Photo 3 (ci-contre) :

Les participants sur le plateau de Séranon
Photos DA

Visite du site d'expérimentation sur les effets du changement climatique de Saint-Michel- l'Observatoire (O3HP)

21 septembre 2010

par Paul SANSOT

En préalable au colloque sur l'observation et l'adaptation des forêts méditerranéennes au changement climatique, Forêt Méditerranéenne a organisé, le 21 septembre 2010, une visite du site d'expérimentation O3HP à l'Observatoire de Haute-Provence dans les Alpes-de-Haute-Provence. Plus de 50 personnes y ont participé. Cette journée complétait les deux premières visites organisées en 2007, sur les deux autres sites d'expérimentation méditerranéens : celui de Puéchabon sur la chênaie verte et celui de Fontblanche sur des peuplements mixtes de pin d'Alep et chêne vert.

Le contexte

Le Centre national de la recherche scientifique (CNRS) a mis en place un projet de recherche intitulé O3HP (Oak Observatory at OHP) pour étudier les effets des changements globaux sur la chênaie pubescente de Haute-Provence et sa biodiversité. L'Observatoire de Haute-Provence, installé au cœur de ce type de chênaie, sert de site expérimental pour mener ces études.

Après avoir été largement exploité en courtes rotations (25 ans environ), ce taillis n'a pas été entretenu depuis plus d'une soixantaine d'années. Il se développe difficilement sur ces sols peu profonds et peu fertiles, épuisés de plus par les précédentes interventions répétées.

Aujourd'hui, la chênaie pubescente est utilisée comme un site expérimental pour étudier les mécanismes d'adaptation à la sécheresse potentiellement induits par les changements climatiques.

L'association Forêt Méditerranéenne a organisé, le 21 septembre 2010, une journée technique pour réunir les acteurs de la forêt méditerranéenne et leur présenter le dispositif expérimental.



Photo 1 :

Le groupe de participants
autour de Thierry
Gauquelin de l'IMEP



Photos 2 et 3

(ci-contre et ci-dessous) :

Un ensemble de passerelles a été implanté en forme de croix sur une zone d'études de 400 m², il permet d'accéder à la canopée de la chênaie pubescente. Ci-dessous et au fond, la coupole abritant le télescope de 1,93 m de diamètre.

Photos DA



Plusieurs types d'expérimentations sont actuellement menés par les chercheurs et les thésards du CNRS, notamment par ceux de l'Institut méditerranéen d'écologie et de paléocécologie (IMEP). Elles concernent :

- la relation entre les conditions climatiques, la diversité biologique et la décomposition de la litière ;
- les variations phénologiques et l'allongement possible de la période de végétation ;
- les effets de la sécheresse sur les échanges gazeux, le bilan d'évapotranspiration et la productivité de l'écosystème.

Présentation des expériences

La décomposition de la litière

L'étude des litières et de leur décomposition permet de comprendre le mécanisme de fertilisation des sols. En se décomposant, sous l'action de la faune du sol et des microorganismes associés, la matière organique végétale enrichit le sol et permet la remise à disposition des éléments nutritifs assimilables par les végétaux.

L'expérimentation mise en place vise à étudier les facteurs qui influencent la décomposition de la litière et d'éclaircir la relation entre la diversité des espèces et la production des écosystèmes.

Selon les chercheurs, la décomposition de la matière organique est influencée par des facteurs abiotiques (température, humidité, etc.) et biotiques (composition des litières, diversité des microorganismes et mésofaune du sol, etc.). La composition des litières est elle-même liée à la diversité des espèces végétales en présence, mais aussi, pour ce qui concerne les métabolites secondaires qu'elles renferment, aux conditions de stress, notamment climatique.

L'une des hypothèses testées est celle d'un effet du changement climatique, via une augmentation du stress hydrique annoncée en région méditerranéenne, sur la diversité et surtout la composition de ces litières et donc sur leur dégradation, ceci s'ajoutant à l'impact direct de la sécheresse sur l'activité des micro-organismes.

Une quantité donnée de feuilles (10 g), soit d'une seule espèce, soit d'un mélange de 2 à 4 espèces (chêne pubescent, pin d'Alep, éra-

ble de Montpellier et sumac) en proportion variable, est enfermée dans des petites boîtes grillagées appelées mésocosmes et disposés sur le sol de la chênaie. Une partie de ces mésocosmes est régulièrement prélevée afin de suivre le taux de décomposition des feuilles et de mettre en évidence un éventuel effet « mixité de litières » sur cette décomposition.

L'allongement de la période de végétation et les variations phénologiques

La phénologie végétale est l'étude des différentes phases de développement saisonnier des végétaux (feuillaison, floraison, fructification et jaunissement).

La durée de feuillaison et les autres périodes des cycles phénologiques sont influencées par les paramètres climatiques et sont donc susceptibles d'évoluer avec le changement climatique annoncé.

Les cycles de développement des insectes sont corrélés avec la phénologie des espèces végétales auxquelles ils sont associés. Par exemple, les abeilles sortent lorsque la floraison a commencé, afin de butiner le pollen des fleurs.

Le changement climatique peut induire un allongement de la période de feuillaison (les arbres débourent plus tôt et jaunissent plus tard).

Le CNRS a donc mis en place une expérience pour étudier ce phénomène en piégeant les insectes associés à certaines phases de la phénologie des espèces végétales présentes sur le site expérimental. En identifiant les espèces d'insectes pris au piège, ils étudient l'allongement des cycles phénologiques et les éventuelles dissociations avec les cycles de développement des insectes.

Les effets de la sécheresse sur les échanges gazeux et sur le bilan d'évapotranspiration de l'écosystème

Les chercheurs souhaitent étudier la relation entre la sécheresse prévue par les modèles du changement climatique et la productivité de l'écosystème de chênes pubescents en mesurant les échanges gazeux et leur bilan hydrique.

Le piège "Malaise"

Le piège à insectes Malaise, du nom de son inventeur, l'entomologiste suédois Malaise (1892-1978) a été inventé en 1937. Il permet de capturer les insectes volants qui se glissent sous la tente et qui, attirés vers le haut et la lumière, sont piégés dans une bouteille dans laquelle ils sont recensés toutes les semaines.



Photos 4, 5 et 6 : Jean-Philippe Orts de l'IMEP nous explique le fonctionnement du piège à insectes

Photos DA

Pourquoi un piège à insectes ?

Cette expérience permet d'étudier, en piégeant les insectes associés à certaines phases de la phénologie des espèces végétales présentes sur le site, l'allongement des cycles phénologiques et les éventuelles dissociations avec les cycles de développement des insectes.

Photo 7 (ci-dessous) :

Des pièges à feuilles et à litière permettent de mieux comprendre le mécanisme de fertilisation des sols. La décomposition de la matière organique est influencée, entre autres, par la présence de métabolites secondaires, issus d'un mécanisme de stress dû à une sécheresse prolongée.

Photo DA





Photo 8 (ci-dessus) :
Le sentier didactique
de l'Observatoire
de Haute-Provence

La sécheresse peut en effet induire des mécanismes d'adaptation qui contraignent les arbres à stopper leur croissance et leur photosynthèse pour préserver leur réserve en eau (fermeture des stomates, création de métabolites secondaires).

L'objectif est de simuler le déficit hydrique et de déterminer son impact sur le fonctionnement de l'écosystème de la chênaie pubescente. Une zone avec exclusion des pluies, comparée à une zone témoin, est prévue dans la station expérimentale au cœur de la chênaie et ce, afin de simuler une diminution des précipitations. Cette exclusion est réalisée grâce à une charpente surmontant la couronne des arbres et munie de toiles se

dépliant automatiquement lors d'événements pluvieux, arrêtant ainsi les précipitations, redistribuées ensuite selon un pourcentage défini au préalable — par exemple 30% en été — comme prévu par certains modèles climatiques.

Des récepteurs et des capteurs sont disposés sur chaque parcelle afin de mesurer :

- les échanges gazeux, notamment les flux de CO₂,

- le processus d'évapotranspiration (bilan hydrique).

L'installation dans la parcelle de deux passerelles (l'une à 80 cm du sol et l'autre à 3,50 m à hauteur de canopée) permet d'effectuer ces mesures à différents niveaux de l'écosystème.

Ces recherches vont permettre d'étudier et de comprendre l'influence de sécheresses répétées sur la productivité des écosystèmes forestiers. Cette expérience nécessitera plusieurs années pour obtenir des résultats concluants, car les arbres peuvent surmonter une sécheresse annuelle, mais il est intéressant d'étudier leurs mécanismes de survie après plusieurs années de stress.

Activités complémentaires

En début d'après midi, le groupe a effectué la visite du sentier didactique de l'Observatoire de Haute-Provence. Des panneaux ponctuent ce parcours pour renseigner les visiteurs des caractéristiques écologiques et édaphiques de l'écosystème de la chênaie pubescente.

La journée s'est ensuite terminée par la visite d'une des coupoles d'observation de l'OHP contenant le télescope de 2 m d'envergure ayant permis la découverte de la première exoplanète en 1995. Ce fut en effet l'opportunité pour ce groupe de forestiers de s'initier aux principes de la recherche astronomique et au mode de fonctionnement de ce télescope, grâce au témoignage d'un ingénieur du centre et à la projection de deux vidéos d'information.

P.S.

Paul SANSOT
A l'époque stagiaire FIF
au Conseil général du Var
Mél : sansotp@yahoo.fr

Photo 9 (ci-dessous) :
Vue du site et d'une des
coupoles d'observation
astronomique
Photos DA



Liste des participants *

- Gaëlle ABRAHAM Centre régional de la propriété forestière
33075 BORDEAUX Cedex g.abraham@crpfaquitaine.fr
- Denise AFXANTIDIS Forêt Méditerranéenne
13002 MARSEILLE
denise.afxantidis@foret-mediterranee.org
- Georges AILLAUD Union Départementale Vie et Nature
13001 MARSEILLE udvn13@gmail.com
- Louis AMANDIER Centre régional de la propriété forestière
de Provence Alpes Côte d'Azur 13004 MARSEILLE
louis.amandier@crpf.fr
- Jean-Luc AMAR "Epoque" 13001 MARSEILLE
epoque1@voila.fr
- Aitor AMEZTEGUI Centre Tecnologic Forestal de
Catalunya 25280 SOLSONA aitor.ameztegui@ctfc.cat
- Laure ANSEL Communes Forestières PACA 04200
SISTERON laure.ansel@communesforestieres.org
- Marguerite ARAGON Syndicat des Propriétaires Forestiers
Privés 06 06200 NICE foret.privee06@wanadoo.fr
- Guy AUBERT 84400 APT
- Vincent BADEAU Institut National de la Recherche
Agronomique 54280 CHAMPENOUX
badeau@nancy.inra.fr
- Virginie BALDY Université de Provence 13331
MARSEILLE Cedex 03 virginie.baldy@univ-provence.fr
- Michel BARITEAU Institut National de la Recherche
Agronomique PACA 84914 AVIGNON Cedex 9
michel.bariteau@avignon.inra.fr
- Dominique BARON Centre d'études et de réalisation
pastorales Alpes Méditerranée 04004 DIGNE LES
BAINS dbaron@cerpam.fr
- Elsa BARRANDON Parc naturel régional du Verdon
04360 MOUSTIERS SAINTE MARIE
ebarrandon@parcduverdon.fr
- Carole BARTHELEMY Université de Provence LPE 13331
MARSEILLE Cedex carole.barthelemy@univ-provence.fr
- Jonathan BAUDEL Cemagref 13182 AIX EN PROVENCE
Cedex 5 jonathanbaudel@hotmail.fr
- Jacqueline BAYOL 13500 MARTIGUES
- Hélène BEAUJOUAN FORESTOUR 13120 GARDANNE
helene.beaujouan@forestour-paca.org
- Liliane BEI PERCY liliane.bei-percy@wanadoo.fr
- Hellmut BEIER 83610 COLLOBRIERES
hellmut.beier@web.de
- Guy BENOIT de COGNAC Forêt Méditerranéenne 13002
MARSEILLE contact@foret-mediterranee.org
- Bénédicte BEYLIER Centre d'études et de réalisation
pastorales Alpes Méditerranée 84400 GARGAS
bbeylier@cerpam.fr
- Mireille BIANCIOTTO Radio Dialogue 13001 MARSEILLE
Mi.presse@gmail.com
- Isabelle BILGER Cemagref 45290 NOGENT SUR
VERNISSON isabelle.bilger@cemagref.fr
- Rémi BLEYNAT Conseil général du Var 83160 LA
VALETTE rbleynat@cg83.fr
- Jeanne BODIN 54000 NANCY bodin@nancy.inra.fr
- Matthias BOER Cemagref 13182 AIX EN PROVENCE
Cedex 5 matthias.boer@cemagref.fr
- Gilles BONIN Université de Provence (e.r.) 13012
MARSEILLE bonin.gilles@wanadoo.fr
- Maurice BONNEAU Génie rural des eaux et forêts (e.r.)
66600 RIVESALTES maurice.bonneau1@free.fr
- Jean BONNIER Forêt Méditerranéenne 13002
MARSEILLE contact@foret-mediterranee.org
- Aurore BONTEMPS Institut National de la Recherche
Agronomique PACA 84914 AVIGNON cedex 9
aurore.bontemps@avignon.inra.fr
- Pierre BOUILLON Ministère de l'Agriculture, de
l'Alimentation, de la Pêche, de la Ruralité et de
l'Aménagement du Territoire 75349 PARIS 07 SP
pierre.bouillon@agriculture.gouv.fr
- Sophie BOURLON Parc Naturel Régional du Luberon
84404 APT Cedex sophie.bourlon@parcduluberon.fr
- Anne BOUSQUET-MELOU Institut Méditerranéen
d'Ecologie et de Paléo-écologie 13331 MARSEILLE Cedex
03 anne.bousquet-melou@univ-provence.fr
- Nathalie BOUTIN Association pour le BioPôle 13545 AIX
EN PROVENCE Cedex 04 biopole.marseille@gmail.com
- Bernard BOUTTE Direction Régionale de l'Alimentation, de
l'Agriculture et de la Forêt 84143 MONTFAVET Cedex
bernard.boutte@agriculture.gouv.fr
- Pierre BOYER Office National des Forêts 06205 NICE
Cedex 03 pierre.boyer@onf.fr
- Patrice BRAHIC Direction Départementale des Territoires
et de la mer 13546 AIX EN PROVENCE Cedex 04
patrice.brahic@agriculture.gouv.fr
- Philippe BREGLIANO Mairie de Correns 83570 CORRENS
mairie@correns.fr
- Nello BROGLIO Association des Communes Forestières du
Var 83340 LE LUC EN PROVENCE
nello.broglio@orange.fr
- Mürsel BULUT Ministry of Environment and Forestry
06560 GAZI / ANKARA TURQUIE
murselbulut@ogm.gov.tr
- Jean-Loup BURTIN Office National des Forêts 06205 NICE
Cedex 03 jean-loup.burtin@onf.fr
- Aurélien CAROD Syndicat mixte des Baronnies Provençales
26510 SAHUNE acarod@baronnies-provencales.fr
- Carine CARTIER Communauté d'Agglomération du Pays
d'Aix 13626 AIX EN PROVENCE Cedex 1
ccartier@agglo-paysdaix.fr
- Antoinette CASILE Direction Régionale de l'Agriculture et
de la Forêt 20176 AJACCIO Cedex
antoinette.casile@agriculture.gouv.fr
- Alain CASTAN Office National des Forêts 13097 AIX EN
PROVENCE Cedex 02 alain.castan@onf.fr
- Orso CERATI Centre régional de la propriété forestière de
Corse 20167 SARROLA-CARCOPINO orso.cerati@crpf.fr
- Frédérique CHAMBONNET Centre régional de la propriété
forestière de Rhône-Alpes 07200 AUBENAS
frederique.chambonnet@crpf.fr
- Olivier CHANDIOUX SARL Alcina 34080 MONTPELLIER
olivier.chandieux@alcina.fr
- Jean-Paul CHASSANY Institut National de la Recherche
Agronomique 34060 MONTPELLIER Cedex 2
chassany@supagro.inra.fr
- Denis CHEISSOUX France Inter 75016 PARIS
Denis.CHEISSOUX@radiofrance.com
- Véronique CHERET Ecole d'ingénieurs de Purpan 31076
TOULOUSE Cedex 3 veronique.cheret@purpan.fr
- Demetrios CHRISTOFIDES Department of forests 1414
NICOSIA CHYPRE dchristofides@fd.moa.gov.cy
- Andreas CHRISTOU Department of forests 1414 NICOSIA
CHYPRE achristou@fd.moa.gov.cy

* Cette liste comprend les participants à la visite (O3HP du 21 septembre 2010) et au colloque (30 novembre au 3 décembre 2010, Marseille et Alpes-Maritimes).

- Pierre CLEMENT Université Lyon 3 (e.r) 69362 LYON
Cedex clement.grave@free.fr
- Eric COLLIN Cemagref 45290 NOGENT SUR
VERNISSON eric.collin@cemagref.fr
- Roland COMMERCION Lycée agricole Digne-Carêmejane
04510 LE CHAFFAUT roland.commercon@educagri.fr
- Ariel CONTE FORESTOUR 13120 GARDANNE
contact@forestour-paca.org
- Edith CONTE 83910 POURRIERES
- François COURBET Institut National de la Recherche
Agronomique PACA 84914 AVIGNON cedex 9
francois.courbet@avignon.inra.fr
- Thomas CURT Cemagref 13182 AIX EN PROVENCE
Cedex 5 thomas.curt@cemagref
- José D'ARRIGO Le Dauphiné 13009 MARSEILLE
darrigojoseph@hotmail.com
- Céline DAMERY Conservatoire du Littoral et des rivages
lacustres 13100 AIX EN PROVENCE
c.damery@conservatoire-du-littoral.fr
- Luc DASSONVILLE Direction Régionale de
l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement
13182 AIX EN PROVENCE Cedex 2
luc.dassonville@developpement-durable.gouv.fr
- Sabine DEBIT Centre d'études et de réalisation pastorales
Alpes Méditerranée 13626 AIX EN PROVENCE Cedex
sdebit@cerpam.fr
- Christelle DEBLAIS Communauté d'Agglomération Pays
d'Aubagne et de l'Etoile 13400 AUBAGNE
christelle.deblais@agglo-paysdaubagne.fr
- Jacques DEGENEVE Centre régional de la propriété
forestière de Rhône-Alpes 07200 AUBENAS
jacques.degeneve@crpf.fr
- Claude DEGIOVANNI Société d'horticulture et
d'arboriculture des Bouches-du-Rhône 13008
MARSEILLE cl.degiovanni@free.fr
- Bruno DEL VITA Parc national du Vésuve 80044
OTTAVIANO (NA) ITALIE bruno.delvita@gmail.com
- Annick DELHAYE Conseil régional Provence-Alpes-Côte
d'Azur 13481 MARSEILLE Cedex 20
adelhay@regionpaca.fr
- Philippe DEMARCQ Office National des Forêts 13097 AIX
EN PROVENCE Cedex 02 philippe.demarcq@onf.fr
- Diane DEMEUSE 26220 DIEULEFIT
- Guy DEMOLIN Mairie de Malaucène 84340 MALAUCENE
mairie@malaucene.fr
- Christian DESPLATS Agence Régionale pour
l'Environnement Provence-Alpes-Côte d'Azur 13591 AIX
EN PROVENCE Cedex 3 c.desplats@arpe-paca.org
- Michel DEUFF TPBM Semaine Provence 13006
MARSEILLE
- Robert DEVAUCHELLE Inventaire Forestier National
34972 LATTES Cedex robert.devauchelle@ifn.fr
- Gaetano DI PASQUALE Università degli studi di Napoli
Federico II 80138 NAPLES ITALIE
gaetano.dipasquale@unina.it
- Sébastien DIETTE SARL Alcina 34080 MONTPELLIER
sebastien.diette@alcina.fr
- Lucio DO ROSARIO Autoridade Florestal Nacional 1069-
040 LISBOA PORTUGAL
lucio.rosario@afn.min-agricultura.pt
- Marc DOMINGUEZ Office National des Forêts 84000
AVIGNON marc.dominguez@onf.fr
- Annick DOUGUEDROIT Université de Provence Aix-
Marseille I 13621 AIX EN PROVENCE
annick.douguedroit@univ-provence.fr
- Louis-Michel DUHEN Centre régional de la propriété
forestière de Provence Alpes Côte d'Azur 13004
MARSEILLE louis-michel.duhen@crpf.fr
- Nicolas DUMOULIN Mairie de Cabriès 13480 CABRIES
maire@cabries.fr
- Jean-Luc DUPUY Institut National de la Recherche
Agronomique PACA 84914 AVIGNON cedex 9
dupuy@avignon.inra.fr
- Daniel ESCALIER 13190 ALLAUCH
- Bruno FADY Institut National de la Recherche
Agronomique PACA 84914 AVIGNON Cedex 9
bruno.fady@avignon.inra.fr
- Gérard FALCONNET Ecole Nationale du Génie Rural des
Eaux et Forêts 54042 NANCY Cedex
gerard.falconnet@engref.agroparistech.fr
- Hubert FALQUE 84330 ST HIPPOLYTE LE
GRAVEYRON
- Max FALQUE 84330 CAROMB
- Stéphane FARCY Service Départemental d'Incendies et de
Secours 83007 DRAGUIGNAN Cedex 15 sfarcy@sdis.fr
- Xavier FARJON 13100 AIX EN PROVENCE
xfarjon@gmail.com
- Catherine FERNANDEZ Université de Provence 13331
MARSEILLE Cedex 03 catherine.fernandez@univ-
provence.fr
- Gaëlle FOSSOY Association Internationale Forêts
Méditerranéennes 13002 MARSEILLE
gaelle.fossoy@aifm.org
- Laurence FOUCAUT Observatoire de l'Environnement et
des Politiques de Protection 13005 MARSEILLE
foucaut.l@odepp.org
- Norbert GALLAND 13320 BOUC-BEL-AIR
galland.norbert@neuf.fr
- Pascal GARGIS Office National des Forêts 06205 NICE
Cedex 03 pascal.gargis@onf.fr
- David GASC Association Internationale Forêts
Méditerranéennes 13002 MARSEILLE
david.gasc@aifm.org
- Thierry GAUQUELIN Université de Provence 13331
MARSEILLE Cedex 03 thierry.gauquelin@univ-
provence.fr
- Grégoire GAUTIER Parc National des Cévennes 48400
FLORAC gregoire.gautier@cevennes-parcnational.fr
- Anne-Cyrielle GENARD Université de Provence 13331
MARSEILLE Cedex 03
- Jacky GERARD Entente pour la Forêt Méditerranéenne
13120 GARDANNE j.gerard@valabre.com
- Chantal GILLET Conseil régional Provence Alpes Côte
d'Azur 13481 MARSEILLE Cedex 20
cgillet@regionpaca.fr
- Marion GILLMANN Institut National de la Recherche
Agronomique PACA 84914 AVIGNON cedex 9
marion.gillmann@avignon.inra.fr
- Pierre GIRARD Direction Régionale de l'Alimentation, de
l'Agriculture et de la Forêt 84143 MONTFAVET Cedex
dsf-se.draaf-paca@agriculture.gouv.fr
- Gaëtan GIRAULT COLINEO-ASSENEMCE 13014
MARSEILLE colineo.assenemce@gmail.com
- André GORLIER Communauté d'Agglomération Pays
d'Aubagne et de l'Etoile 13400 AUBAGNE
andre.gorlier@agglo-paysdaubagne.fr
- Anne-Marie GRANIER 30100 ALES
annemariegranier@free.fr
- Francesco GROHMANN Regione Umbria 06124 PERUGIA
ITALIE forestazione@regione.umbria.it
- Geneviève GUIGNOT 84200 CARPENTRAS
genevieve.guignot@free.fr
- Françoise HALLARD Société du Canal de Provence 13182
AIX EN PROVENCE Cedex 5 francoise.hallard@canal-
de-provence.com
- Florian HOPP Communauté d'Agglomération du Pays d'Aix
13626 AIX EN PROVENCE Cedex 1 fhopp@agglo-
paysdaix.fr

- Roland HUC Institut National de la Recherche Agronomique PACA 84914 AVIGNON cedex 9
roland.huc@avignon.inra.fr
- Georges ILLY Forêt Méditerranéenne 13002 MARSEILLE
contact@foret-mediterranee.org
- Giorgio IORIO Regione Umbria 06124 PERUGIA
iorio.giorgio@cmvalnerina.it
- Sipi JAAKKOLA 83136 LA ROQUEBRUSSANNE
sipi_jaakkola@yahoo.com
- Philippe JORIOT 05000 GAP philippe.joriot@wanadoo.fr
- Emmanuelle JOURDAIN Forêt Méditerranéenne 13002 MARSEILLE emmanuelle.jourdain@foret-mediterranee.org
- Farid KACED Entente pour la Forêt Méditerranéenne 13120 GARDANNE f.kaced@valabre.com
- Igor KOLAR Associate for International Cooperation HR-10450 JASTREBARSKO igork@sumins.hr
- Jean LABADIE Conseil général du Var 83160 LA VALETTE jlabadie@cg83.fr
- Jean LADIER Office National des Forêts 04100 MANOSQUE jean.ladier@onf.fr
- Lydwine LAFONTAINE Secrétariat technique Conjoint programme Med 13481 MARSEILLE Cedex 20
llafontaine@regionpaca.fr
- Michèle LAGACHERIE Centre régional de la propriété forestière Languedoc-Roussillon 34097 MONTPELLIER Cedex 5 michele.lagacherie@crpf.fr
- Katia LAGARDE 83700 SAINT RAPHAEL
katia.lagarde@wanadoo.fr
- Dimitris LAMPROU Région Nord Egée 81100 MYTILENE GRECE dlamproulos@gmail.com
- Guy LANDMANN GIP ECOFOR 75116 PARIS
guy.landmann@gip-ecofor.org
- Luc LANGERON Entente pour la Forêt Méditerranéenne 13120 GARDANNE l.langeron@valabre.com
- Samuel LARDEUX Office National des Forêts 06205 NICE Cedex 03 samuel.lardeux@onf.fr
- Charles LAUGIER Conseil régional Provence-Alpes-Côte d'Azur 13481 MARSEILLE Cedex 20
chlaugier@regionpaca.fr
- Pascale LAUSSEL Minute Papillon 26400 CREST
pascale.lausssel@minutepapillon.eu
- Albert LE COURBE Pays Asses, Verdon, Vaire, Var 04370 BEAUVEZER le-courbe.albert@gmail.com
- Patrick LE MEIGNEN 04140 SEYNE LES ALPES
patrick.le-meignen@orange.fr
- François LEFEVRE Institut National de la Recherche Agronomique PACA 84914 AVIGNON cedex 9
lefevre@avignon.inra.fr
- Myriam LEGAY Office national des forêts 54840 VELAINNE EN HAYE myriam.legay@onf.fr
- Julien LEMOND Météo France 31100 TOULOUSE
julien.lemond@meteo.fr
- Christophe LEROUX 13100 Aix en Provence
christophepierrelerox@gmail.com
- Guy LEROY Office National des Forêts du Var 83220 LE PRADET guy.leroy@onf.fr
- Jacques LEVERT Direction Régionale de l'Alimentation, de l'Agriculture et de la Forêt de la Région Provence- Alpes-Côte d'Azur 13003 MARSEILLE
jacques.levert@agriculture.gouv.fr
- Nicole LIAUTAUD Syndicat des Propriétaires Forestiers Privés 06 06200 NICE foret.privee06@wanadoo.fr
- Jérôme LIMAGNE Conseil général du Var 83160 LA VALETTE jlimagne@cg83.fr
- Pierre MACE Association Régionale de Défense des Forêts Contre l'Incendie 33075 BORDEAUX Cedex
pierre.mace@ardfci.com
- Marc MAILHE Parc Naturel Régional du Haut-Languedoc 34220 SAINT PONS atechnique-education@parc-haut-languedoc.fr
- Guy MARECHAL Conseil général des Alpes-Maritimes 06030 NICE Cedex gmarechal@cg06.fr
- Stéphanie MARI Conseil général de Vaucluse 84909 AVIGNON Cedex 9 stephanie.mari@cg84.fr
- Guillaume MARIE Institut National de la Recherche Agronomique PACA 84914 AVIGNON cedex 9
guillaume.marie@avignon.inra.fr
- Cécile MARIS Centre régional de la propriété forestière 33075 BORDEAUX Cedex c.maris@crpfaquitaine.fr
- Erwan MAROLLEAU Société d'Aménagement Foncier et d'Etablissement Rural 04101 MANOSQUE
erwan.marolleau@safer-paca.com
- Gilles MARTINEZ Charte Forestière de Territoire 04230 SAINT ETIENNE LES ORGUES
gilles.martinez@parcduluberon.fr
- Valérie MARTINEZ Conseil régional Provence Alpes Côte d'Azur 13481 MARSEILLE Cedex 20
vmartinez@regionpaca.fr
- Daniel MATHIEU Association Tela Botanica 34090 MONTPELLIER dmathieu@tela-botanica.org
- Jean-Paul METAILIE Université Toulouse Le Mirail 31058 TOULOUSE Cedex 1 jean-paul.metailie@univ-tlse2.fr
- Dominique MICAUX Office National des Forêts 11870 CARCASSONNE Cedex 09 dominique.micaux@onf.fr
- Robert MIECHAMP Communauté d'Agglomération Pays d'Aubagne et de l'Etoile 13400 AUBAGNE
- Chloé MONTA ASL de gestion forestière de la subéraie varoise 83340 LE LUC asl.suberaie.varoise@gmail.com
- Jean de MONTGOLFIER Ecole Nationale du Génie de l'Eau et de l'Environnement de Strasbourg 67000 STRASBOURG engees@engees.u-strasbg.fr
- Daniel MOUSAIN Société d'horticulture et d'histoire naturelle de l'Hérault 34000 MONTPELLIER
contact1@shhnh.com
- Claude MOUTARDE Office National des Forêts du Var 83220 LE PRADET claudemoutarde@onf.fr
- Annelise MULLER Union Régionale Vie et Nature 13001 MARSEILLE urvn.annelisemuller@gmail.com
- Véronique MURE 24540 MARSALLES
veroniquepure@orange.fr
- Aminata N'DIAYE BOUBACAR Cemagref 13182 AIX EN PROVENCE Cedex 5 aminata.ndiaye-boubacar@cemagref.fr
- Cyrille NAUDY Communauté d'Agglomération du Pays d'Aix 13626 AIX EN PROVENCE Cedex 1
CNAudy@agglo-paysdaix.fr
- Jean-Michel NINGRE 13009 MARSEILLE jean-michel.ningre@wanadoo.fr
- Sébastien NINON Conseil régional Provence-Alpes-Côte d'Azur 13002 MARSEILLE sninon@regionpaca.fr
- Michel OBERLINKELS Caisse des Dépôts et Consignations Biodiversité 13203 MARSEILLE Cedex 01
m.oberlinkels.cdcbiodiv@forestiere-cdc.fr
- Elena ORMENO LAFUENTE Université de Provence 13331 MARSEILLE Cedex 03 elena.ormeno@univ-provence.fr
- Jean-Philippe ORTS Université de Provence 13331 MARSEILLE Cedex 03
- Alexia PAILLER Faculté de Saint Jérôme IMEP 13397 MARSEILLE Cedex 20 alexia_pailier@msn.com
- Albert PAMIES LACUNZA Centre de la Propriété Forestal 08222 TERRASSA ESPAGNE apamiesl@gencat.cat
- Vincent PASTOR Service Départemental d'Incendies et de Secours 13326 MARSEILLE Cedex 15 vpastor@sdis13.fr
- Yves PENET Office National des Forêts 13097 AIX EN PROVENCE Cedex 02 yves.penet@onf.fr

- Céline PERRIER RMT Adaptation des forêts au changement climatique
75116 PARIS celine.perrier@cnpf.fr
- Jean-Luc PEYRON GIP ECOFOR 75116 PARIS
peyron@gip-ecofor.org
- Colette PEZEU 84330 CAROMB
- Olivier PICARD Institut pour le Développement Forestier
75116 PARIS olivier.picard@cnpf.fr
- François PIMONT Institut National de la Recherche Agronomique PACA 84914 AVIGNON cedex 9
francois.pimont@avignon.inra.fr
- Guillaume PIQUE Communauté d'Agglomération du Pays d'Aix 13626 AIX EN PROVENCE Cedex 1 gpique@agglo-paysdaix.fr
- Laetitia POFFET Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation, de la Pêche, de la Ruralité et de l'Aménagement du Territoire 75732 PARIS Cedex 15
laetitia.poffet@agriculture.gouv.fr
- Bernard PREVOSTO Cemagref 13182 AIX EN PROVENCE Cedex 5 bernard.prevosto@cemagref.fr
- Simone QUARD FRUTOSO 26220 DIEULEFIT
lacledelements@orange.fr
- Thierry QUESNEY Office National des Forêts 13097 AIX EN PROVENCE Cedex 02 thierry.quesney@onf.fr
- Jean-Marie RAME Communauté d'Agglomération Pays d'Aubagne et de l'Etoile 13400 AUBAGNE
- Anais RANCON Faculté de Saint Jérôme IMEP 13397 MARSEILLE Cedex 20 anais.rancon@univ-cezanne.fr
- Daniel REBOUL Office National des Forêts 04000 DIGNE LES BAINS daniel.reboul@onf.fr
- Denis REVALOR Syndicat des Propriétaires Forestiers Sylviculteurs des Bouches-du-Rhône 13120 GARDANNE syndicat-13@foretpriveefrancaise.com
- Elisabeth RICAUD C.I.R.A.M.E 84200 CARPENTRAS
ricaud-e@agrometeo.fr
- Jean-Claude RICCI Institut Méditerranéen du Patrimoine Cynégétique et Faunistique 30310 VERGEZE
jericci@impf.fr
- Eric RIGOLOT Institut National de la Recherche Agronomique PACA 84914 AVIGNON cedex 9
eric.rigolot@avignon.inra.fr
- Christian RIPERT Cemagref 13182 AIX EN PROVENCE Cedex 5 christian.ripert@cemagref.fr
- Vincent RIVIERE 13016 MARSEILLE vin-riv@yahoo.fr
- Evelyne RODRIGUEZ Conseil général des Bouches-du-Rhône 13256 MARSEILLE Cedex 20
evelyne.rodriguez@cg13.fr
- Magali ROSSI WWF France 13001 MARSEILLE
mrossi@wwf.fr
- Rosette ROUX Centre de découverte de la nature 84390 SAULT cd.nature@orange.fr
- Claudette RUQUIER Syndicat des Propriétaires Forestiers Privés 06 06200 NICE foret.privee06@wanadoo.fr
- Kamel SADKI Groupe Energies Renouvelables et Environnement 13006 MARSEILLE k.sadki@geres.eu
- Valérie SALEIL Office National des Forêts du Var 83220 LE PRADET valerie.saleil@onf.fr
- Christian SALVIGNOL Centre forestier de la région Provence-Alpes-Côte-d'Azur 84240 LA BASTIDE DES JOURDANS salvignol@centre-forestier.org
- Paul SANSOT Conseil général du Var 83160 LA VALETTE
sansotp@yahoo.fr
- Mathieu SANTONJA Université de Provence 13331 MARSEILLE Cedex 03 mathieu.santonja@univ-provence.fr
- Rémi SAVAZZI Office National des Forêts 13097 AIX EN PROVENCE Cedex 02 remi.savazzi@onf.fr
- Ceydric SEDILOT-GASMI Société forestière de la Caisse des Dépôts 75002 PARIS ceydric.sedilotgasmi@forestiere-cdc.fr
- Arnaud SEGARD ASL de gestion forestière de la subéraie varoise 83340 LE LUC asl.suberaie.varoise@gmail.com
- Bernard SEGUIN Institut National de la Recherche Agronomique PACA 84914 AVIGNON Cedex 9
bernard.seguin@avignon.inra.fr
- Eric SERANTONI Parc national de Port Cros 83406 HYERES Cedex eric.serantoni@espaces-naturels.fr
- Isabelle SICARD Grand Site Sainte Victoire 13090 AIX EN PROVENCE isabelle.sicard@grandsitesaintevictoire.com
- Pierre SICARD ACRI-ST 06904 SOPHIA ANTIPOLIS cedex pierre.sicard@acri-st.fr
- Thierry SIFFERT 13006 MARSEILLE
thierry.siffert@educagri.fr
- Paulo SILVA Association de Défense du Patrimoine de Mertola 7750-328 MERTOLA PORTUGAL
interambiental@adpm.pt
- Guillaume SIMIONI Institut National de la Recherche Agronomique PACA 84914 AVIGNON cedex 9
guillaume.simioni@avignon.inra.fr
- Sylvestre SISCO Office du Développement Agricole et Rural de Corse 20601 BASTIA sylvestre.sisco@odarc.fr
- Jean-François SOULAS 13009 MARSEILLE
jfsoulas@free.fr
- Tim SPARHAM 11360 DURBAN
monika_huelse@hotmail.com
- Fabienne TANCHAUD Conseil général du Var 83160 LA VALETTE ftanraud@cg83.fr
- Patrizia TARTARINO Università di Bari 70126 BARI
patrizia.tartarino@agr.uniba.it
- Erik TERTOIS SARL Alcina 34080 MONTPELLIER
- Nicole TRONCHE Union Départementale Vie et Nature 83820 RAYOL CANADEL cigales.t@wanadoo.fr
- Léita TSCHANZ Syndicat mixte des Baronnie Provençales 26510 SAHUNE Itschanz@baronnies-provencales.fr
- Suat TÜREYEN Ministry of Environment and Forestry 06560 GAZI / ANKARA TURQUIE
suattureyen@ogm.gov.tr
- Jean-Charles VALETTE Institut National de la Recherche Agronomique PACA 84914 AVIGNON cedex 9
jean.charles.valette@avignon.inra.fr
- Daniel VALLAURI WWF France 13001 MARSEILLE
dvallauri@wwf.fr
- Jacques VARRONE FORESTOUR 13120 GARDANNE
contact@forestour-paca.org
- Nicolas VAS Groupe International d'Etudes des Forêts Sud Européennes 06300 NICE vasicolas@aol.com
- Michel VENNETIER Cemagref 13182 AIX EN PROVENCE Cedex 5 michel.vennetier@cemagref.fr
- Pau VERICAT GRAU Centre Tecnologic Forestal de Catalunya 25280 SOLSONA ESPAGNE
pau.vericat@ctfc.cat
- Rémi VEYRAND Association Internationale Forêts Méditerranéennes 13002 MARSEILLE
remi.veyrand@aifm.org
- Marianne VIGNOLLES Conseil général des Alpes-Maritimes 06030 NICE Cedex mvignolles@cg06.fr
- Claire VIGNON Office National des Forêts 13097 AIX EN PROVENCE Cedex 02 claire.vignon@onf.fr
- Sandrine VITALI Conseil général du Var 83160 LA VALETTE
- Stratos VOUGIOUKAS Région Nord Egée 81100 MYTILENE GRECE ptaba@otenet.gr
- Gérard WILLEY 13008 MARSEILLE
gerardwilley@gmail.com
- Geneviève ZUENA-DEBLEVID 13009 MARSEILLE
gzuena@free.fr