



# Colloque de restitution des projets du Réseau Mixte Technologique AFORCE

## Dossier des participants

*Mercredi 12 décembre 2012*  
*FCBA, Paris*



# Colloque de restitution des projets du Réseau Mixte Technologique AFORCE

**AFORCE**  
RMT Adaptation des forêts  
au changement climatique

Mercredi 12 décembre 2012, FCBA (Paris)

09h00	Accueil	14h10	<b>Session 3 : Croissance et sylviculture</b> (Philippe Riou-Nivert, CNPF/IDF)
09h30	<b>Introduction</b> (Olivier Picard, CNPF/IDF)		
09h40	<b>Session 1 : Stations forestières et vulnérabilité des peuplements</b> (Guy Landmann, Gip Ecofor) <ul style="list-style-type: none"><li>▪ Indicateurs architecturaux de la réponse des arbres aux modifications climatiques (Sylvie Sabatier, Cirad Montpellier)</li><li>▪ Cartographie de l'évolution de la contrainte hydrique en contexte de réchauffement climatique et exemple d'utilisation dans le cadre des catalogues et des guides de stations forestières (Christian Piedallu, AgroParisTech Nancy)</li><li>▪ TRAITAUT - Traits fonctionnels et autécologie des essences forestières (Alice Michelot, Gip Ecofor)</li></ul>		<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Quelles essences favoriser dans les peuplements mélangés réguliers pour augmenter la résistance et la résilience des arbres au climat et à ses aléas ? (François Lebourgeois, AgroParisTech Nancy)</li><li>▪ Installation et conduite des peuplements de Cèdre pour faire face au changement climatique. (François Courbet, Inra Avignon et Michèle Lagacherie, CRPF Languedoc-Roussillon)</li></ul>
11h15	Pause	15h15	Pause
11h35	<b>Session 2 : Ressources génétiques</b> (Alexis Ducouso, Inra Pierroton) <ul style="list-style-type: none"><li>▪ NOMADES - NOuvelles Méthodes d'Acclimatation Des Essences forestières (Hervé Le Bouler, ONF)</li><li>▪ Quelles ressources génétiques au sein du genre Abies pour faire face aux changements climatiques ? (Hendrik Davi, Inra d'Avignon)</li></ul>	15h30	<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Sylviculture adaptative pour le sapin pectiné dans l'arrière-pays méditerranéen – Constitution d'un réseau d'essais (Jean Ladier, ONF Avignon)</li></ul>
12h40	Repas	16h00	<b>Session 4 : Économie</b> (Olivier Picard, CNPF/IDF) <ul style="list-style-type: none"><li>▪ En quoi l'analyse économique permet-elle d'informer les choix de gestion sous incertitude climatique ? Étude pilote sur le cas du Douglas (Marielle Brunette, AgroParisTech Nancy/Inra et Nathalie Bréda, Inra Nancy)</li></ul>
		16h40	<b>Session 5 : Bilan des activités du réseau et nouvelles orientations de travail</b> (Céline Perrier, CNPF/IDF) Échanges avec la salle
		17h15	<b>Conclusions</b> : par J.-E. Hermès, France Bois Forêt par J. Andrieu, MAAF
		17h30	Fin de la journée

Contact : Olivier PICARD et Céline PERRIER, IDF - 47, rue de Chaillot - F-75116 Paris  
Tél : 01 47 20 68 15 - Courriel : olivier.picard@cnpf.fr, celine.perrier@cnpf.fr



MINISTÈRE  
DE L'AGRICULTURE  
ET DE LA FORÊT

# Session 1

## Stations forestières et vulnérabilité des peuplements

- Indicateurs architecturaux de la réponse des arbres aux modifications climatiques  
*(Sylvie Sabatier, Cirad Montpellier)*
- Cartographie de l'évolution de la contrainte hydrique en contexte de réchauffement climatique et exemple d'utilisation dans le cadre des catalogues et des guides de stations forestières  
*(Christian Piedallu, AgroParisTech Nancy)*
- TRAITAUT - Traits fonctionnels et autécologie des essences forestières  
*(Alice Michelot, Gip Ecofor)*

## **Indicateurs architecturaux de la réponse des arbres aux modifications climatiques : pin d'Alep, pin sylvestre, cèdres, sapins, douglas, hêtres, chêne pédonculé et châtaignier**

*C. Drénou (IDF, Toulouse), Y. Caraglio (CIRAD-AMAP, Montpellier), S. Sabatier (CIRAD-AMAP, Montpellier), H. Davi (INRA-URFM, Avignon), N. Mariotte (INRA-URFM, Avignon).*

Les contraintes climatiques affectent le comportement, la croissance et la productivité des arbres en forêt. Pour évaluer l'impact des gelées précoces ou tardives, de sécheresses ou de températures élevées, les scientifiques et les gestionnaires mettent en place des réseaux de plantation « observatoires du changement climatique » qui requièrent des indicateurs simples de l'état des arbres dans le peuplement. Même si le diagnostic d'un dépérissement demande souvent une analyse microscopique ou chimique, c'est sur le terrain que l'observation des symptômes apparaissant sur les parties aériennes joue un rôle décisif. Comment utiliser la dynamique de croissance de l'arbre dans le diagnostic forestier ? Comment distinguer précocement le caractère réversible ou irréversible d'un dépérissement ?

Au cours de son développement, l'arbre, par sa croissance en hauteur, rencontre des conditions de lumière et d'hygrométrie différentes se traduisant par une modification progressive de l'interaction plante/milieu. Une analyse morphologique rétrospective permet de décrire et de prendre en compte ces réponses de l'arbre au cours du temps.

Les espèces étudiées sont des conifères et des feuillus, et possèdent des traits architecturaux contrastés. Ceci permettra, à terme, de concevoir des notations communes à toutes les espèces. La séquence de développement de l'espèce permet de décrire le développement moyen de la plante au cours de sa vie (régénération, arbre d'avenir,

arbre du présent, arbre du passé). Elle peut être utilisée comme référence pour chaque espèce étudiée et ainsi compléter la notion d'arbre référent pour les notations sur le terrain.

Dans l'exposé, nous avons choisi de présenter quelques critères simples couplant l'échelle d'observation dans la plante (arbre entier, système ramifié, pousse annuelle), du niveau dans l'arbre (cime, houppier notable, tronc/branches basses), le stade de développement de l'arbre (jeune, mature) et la nature des observations (contour du houppier, mortalité, épicormiques, structure, descente de cime, sexualité). L'intérêt de ces critères pour le diagnostic de l'état d'un arbre est montré à travers deux exemples : la structure de la pousse annuelle et l'expression des rameaux épicormiques.

Le passage du diagnostic au pronostic (notion de résilience et de dépérissement irréversible) s'appuie sur trois méthodes rétrospectives : la dendrochronologie, la croissance cumulée et l'expression de la ramification épicormique.

Une fois intégrés dans des fiches de notation et des clefs de détermination, les critères permettront un suivi dans le temps pour valider les indicateurs (5 ans à partir de 2013) et comprendre leur signification dans le contexte des événements climatiques extrêmes. Dans le cadre de ce projet, un outil prototype de diagnostic assisté par ordinateur (comme le logiciel *Xper*) avec des applications sur tablette numérique sera testé.

*Mots clés : indicateurs, analyse rétrospective, architecture des plantes, dépérissement des arbres*

## **Cartographie de l'évolution de la contrainte hydrique en contexte de réchauffement climatique et exemple d'utilisation dans le cadre des catalogues et des guides de stations forestières**

*Christian Piedallu (AgroParisTech, Nancy)*

Les outils permettant le choix des essences, comme les catalogues de stations forestières, ont du mal à prendre en compte les effets potentiels du changement climatique (Gaudin, 2008; Landmann *et al.*, 2008; Riou-Nivert, 2008a, b). Or, une forte demande se fait sentir lors de la création de guides ou de nouveaux catalogues, ou lors de la mise à jour des documents existants (Legay *et al.*, 2007). La contrainte hydrique, analysée à travers le calcul d'un bilan hydrique, est reconnue à la fois comme étant un des facteurs les plus importants vis-à-vis de la ressource forestière, et probablement l'un des plus affectés par le changement climatique. Cependant, son estimation, qui se fait traditionnellement à l'échelle de la placette, est très coûteuse, rendant cette approche impossible sur de vastes échelles (Granier *et al.*, 1999; Berges and Balandier, 2010). Actuellement, les informations cartographiques disponibles pour la France concernent les bilans hydriques climatiques, qui représentent la différence entre les pluies et l'évapotranspiration ( $P - ETP$ ). Cependant, du fait de l'importance du compartiment sol qui permet de stocker pendant l'hiver de l'eau disponible pour les plantes pendant l'été, cette donnée est susceptible d'être très imprécise. La prise en compte du compartiment sol dans le calcul du bilan en eau est donc nécessaire pour une évaluation plus fine.

L'objectif du travail était de créer, de valider et de déterminer l'intérêt et l'utilisation possible pour le forestier de cartes numériques décrivant la variabilité spatiale de l'eau du sol. Ce travail a été réalisé en mobilisant divers outils liés aux systèmes d'informations géographiques

et aux techniques de cartographie prédictive (Franklin, 1995; McBratney *et al.*, 2003), à travers différentes étapes :

- Réalisation d'une carte de bilan en eau des sols à l'échelle régionale, en sélectionnant les données et les méthodes les plus appropriées ;
- Validation des données produites et comparaison avec celles qui sont classiquement utilisées ;
- Évaluation de leur utilisation possible dans le cadre de la mise à jour d'un catalogue des stations forestières. Nous avons profité de la refonte prévue du guide des stations « les Plateaux calcaires de Champagne-Ardenne, du nord et de l'est de la Bourgogne », rédigé par Laurence Milard (CRPF) en 2004 pour tester les potentialités liées à la carte produite.

Ce travail a été réalisé en un an, et a mobilisé une équipe pluridisciplinaire de chercheurs et de gestionnaires forestiers, du centre AgroParisTech-Engref, des CRPF Champagne-Ardenne et Alsace Lorraine, et de l'ONF. Il a donné lieu à l'embauche de deux étudiants de niveau master 2, Jean-Baptiste Richard (Richard, 2011) issu de la FIF et Thomas Villiers stagiaire IAE (Villiers, 2011), qui ont soutenu en septembre 2011 et dont les rapports de stage sont disponibles. Trois publications nationales et internationales ont également été rédigées. Les résultats montrent la possibilité de cartographier la contrainte hydrique des sols à des échelles variant du pays à la forêt, avec cohérence au regard de relevés de terrain. Ils montrent également que malgré les imprécisions liées à l'estimation de la RUM, la cartographie du bilan en eau du sol est plus pertinente que des données de pluies ou de bilans hydriques climatiques pour prédire la distribution des espèces. Enfin, ils montrent que la carte produite diverge assez fortement avec les informations données par les catalogues de stations forestières sur les Plateaux calcaires du nord-est de la France, qui ne prennent pas en compte la variabilité spatiale du climat.

## **TRAITAUT : Traits fonctionnels et autécologie des essences forestières**

*Alice Michelot (Gip Ecofor), Sophie Gachet (Université Aix-Marseille, IMBE), Myriam Legay (ONF, Nancy), Guy Landmann (Gip Ecofor)*

Afin d'évaluer les conditions d'adaptation des forêts aux changements climatiques, il est nécessaire de connaître l'autécologie des essences, définie comme la science des réponses biologiques de chaque espèce aux facteurs abiotiques. Dans les catalogues forestiers, elle est généralement décrite avec des paramètres empiriques, peu modulables dans le contexte des changements climatiques. Il est donc nécessaire de rénover cette approche en incluant des paramètres quantifiables comme les traits fonctionnels. Il s'agit de caractéristiques morpho-physio-phénologiques qui influencent la valeur sélective des individus : les caractéristiques des feuilles (surface, masse...) ou des graines (taille, longévité), la densité du bois, ou encore la capacité photosynthétique des essences, ...

D'une durée d'un an (débuté en février 2012), le projet Traitaut est co-financé par le GIP Ecofor et le RMT Aforce. Ses objectifs sont : (1) de clarifier les définitions et les contours de l'autécologie, (2) d'établir une synthèse sur l'utilisation de l'autécologie des essences forestières dans les outils d'aide à la décision en environnement changeant, (3) de constituer une communauté R&D dans le domaine de l'autécologie des essences forestières et des traits fonctionnels, en mettant notamment en place un portail web collaboratif et (4) d'initier le développement d'une nouvelle méthode quantitative et généralisable pour décrire l'autécologie des essences forestières.

Pour rénover l'approche autécologique dans le contexte des changements climatiques, nous avons analysé quatre outils d'aide à la décision, élaborés à l'étranger et intégrant l'autécologie. Cette analyse nous a permis d'établir un cahier des charges pour construire ce type d'outil en France. L'objectif est de bâtir un outil à destination des

gestionnaires forestiers. L'échelle spatiale pourrait être multiple, de la parcelle au massif, et l'échelle temporelle double, à court et long termes. L'aide à la décision sera principalement une aide au choix des essences. L'outil doit être facile d'accès et contenir une plateforme géomatique afin de référencer spatialement les paramètres initiaux, contenir des couches multiples (climat, sol...) et permettre des sorties sous forme de cartes. Le choix des modèles (croissance, niche, mécaniste) est à définir en fonction des besoins de gestion et des échelles spatiales les plus pertinentes. Les performances environnementales seront décrites sous la forme de fonction de réponse calibrées ou validées par les données recueillies *via* une base bibliographique. Ces données, triées par facteurs et réponses, permettront de paramétrer les modèles et de les valider ou de les calibrer. Un module d'analyse de décision multicritère pourra être développé séparément afin de prendre mieux en compte les enjeux économiques et sociaux dans la gestion forestière.

Pour déterminer l'apport des traits fonctionnels dans la rénovation de l'approche autécologique, la base de données mondiale TRY a été consultée pour une liste de 23 essences forestières. Une première analyse montre que cette base contient un grand nombre de données avec des traits variés (traits foliaires, échanges gazeux, anatomie du bois...). La variabilité intra-spécifique des traits rend difficile l'obtention d'une moyenne comparable entre espèces. Il semble nécessaire de calculer des moyennes sur une seule base à chaque fois pour avoir des valeurs homogènes. Pour la suite du projet, les données de TRY pourront être utilisées afin de paramétrer des modèles. En revanche, il manque généralement les valeurs des facteurs environnementaux pour chaque mesure qui sont pourtant nécessaires à la construction de fonctions de réponse par espèce.

Un portail internet collaboratif sur l'autécologie des essences forestières a été créé à l'adresse : [www.gip-ecofor.org/traitaut](http://www.gip-ecofor.org/traitaut). Ce site contient un annuaire des membres, une base de sources

bibliographiques, un recensement des outils sur l'autécologie et un espace d'échanges sur les projets et travaux en lien avec le projet Traitaut. La base de sources bibliographiques est libre d'accès. Elle permet d'ajouter des publications et de trier les sources par essence, facteur et réponse biologique, ce qui est un point fort par rapport aux bases existantes.

Pour les suites du projet Traitaut, il est prévu : de développer le site internet et notamment d'enrichir la base bibliographique, de publier des articles et un document de synthèse sur les outils d'aide à la décision, et d'élaborer des projets de recherche avec la communauté créée.

## Session 2

### Ressources génétiques

- NOMADES - NOuvelles Méthodes d'Acclimatation  
Des Essences forestières  
*(Hervé Le Bouler, ONF)*
- Quelles ressources génétiques au sein du genre Abies  
pour faire face aux changements climatiques ?  
*(Hendrik Davi, Inra d'Avignon)*

## Quelles ressources génétiques au sein du genre *Abies* pour faire face aux changements climatiques ?

*Hendrik Davi (Inra Avignon)*

Dans le contexte des changements globaux, les forêts risquent d'être fortement impactées en termes de production, d'état sanitaire ou de régénération. Le sapin pectiné est une essence très sensible à la sécheresse atmosphérique et édaphique. Après une sécheresse prolongée, il perd des aiguilles et son état sanitaire global peut se détériorer. Si les mauvaises années se succèdent, une spirale du déclin incluant une plus grande vulnérabilité aux insectes sous corticaux peut conduire à la mort de l'arbre, plusieurs années après l'événement déclenchant le processus de dépérissement. A long terme, il semble que les caractéristiques écophysiologiques du sapin pectiné le rendent trop vulnérable aux sécheresses et aux fortes températures attendues. Il est donc nécessaire de réfléchir à l'évolution de certaines de nos sapinières situées en marge sud, vers des forêts plus adaptées aux nouvelles conditions. Dans cette perspective, quatre voies s'offrent à nous : (i) favoriser l'adaptation génétique des ressources locales de sapin pectiné, (ii) utiliser des provenances de Sapin pectiné moins vulnérables à la sécheresse, (iii) utiliser d'autres espèces du même genre comme les sapins méditerranéens notoirement plus résistants, (iv) trouver des essences de remplacement en dehors du genre *Abies*. L'objectif du projet financé par le RMT AFORCE était d'avancer sur les voies (ii) et (iii). Plus précisément, nos objectifs étaient de (a) déterminer quelles mesures et quel échantillonnage devaient être faits sur les plantations comparatives pour analyser des différences de vulnérabilité aux aléas climatiques et (b) d'estimer le niveau de variabilité de la vulnérabilité du sapin aux aléas climatiques.

Nous avons d'abord fait un bilan des dispositifs existants. Ce bilan relativement achevé pour l'INRA et l'IDF demeure incomplet pour l'ONF. Il devra aussi être élargi aux dispositifs européens similaires. Il a

permis aussi d'évaluer les déficits actuels. Du travail semble nécessaire dans deux directions : il faut améliorer la caractérisation de l'environnement des dispositifs et mieux connaître les sites d'où sont issus les provenances testées. Sur les 56 dispositifs de l'INRA, 10 ont été abandonnés et nous n'avons pas l'information pour une vingtaine d'entre eux. Il est donc nécessaire de continuer l'inventaire des dispositifs et d'assurer des campagnes régulières de mesures d'inventaires. Des remesures trop espacées dans le temps rendent difficile l'interprétation des résultats. Respecter un pas de temps de 5 ou 10 ans semble raisonnable.

Les remesures des inventaires de 6 dispositifs existants ont constitué un important travail financé par le RMT AFORCE. Cela nous a permis de montrer :

- L'importance de la prise en compte explicite de la compétition, ce qui rend nécessaire la spatialisation des arbres et la mesure des dimensions des arbres plantés en regarnis ou situés dans des blocs de bordure non suivis ;
- La nécessité de réaliser des coupes et des élagages afin d'assurer une conduite réaliste des peuplements ;

Les mesures de largeur de cernes et de dendrométries effectuées sur un sous-échantillon montrent que :

- L'estimation de la croissance annuelle passée est très informative sur la dynamique interannuelle de la croissance et les événements climatiques qui l'ont impactée.
- La largeur de cerne moyenne et la sensibilité au climat sont deux indicateurs potentiellement efficaces pour évaluer la vulnérabilité des provenances. Par contre, la résistance et la résilience à un événement spécifique de sécheresse ne semblent pas, à ce stade, informatives. Ces deux paramètres sont souvent strictement anti-corrélés et la vulnérabilité dépend de processus agissant à plus long terme.

Un dernier objectif était de voir si un classement des provenances et des espèces était possible selon leur croissance, d'une part, et selon leur mortalité, d'autre part. Sur tous les sites, les effets provenances ou espèces étaient significatifs, mais la part de variance expliquée par ces effets (autour de 3%) est assez faible.

De plus, nous avons montré pour *Abies cephalonica* que si les classements entre provenances étaient relativement conservés pour la croissance, ils étaient moins bien conservés pour la mortalité quand on compare différents dispositifs. Les recommandations tirées de ces mesures ne peuvent qu'être très générales. *Abies cephalonica*, *Abies bornmuelleriana* et *Abies nordmanianna* semblent bien adaptés aux sites secs (Trops : Indice de Martonne mensuel moyenne de 13.4 entre juin et août). Néanmoins, la plus grande précocité du débourrement d'*Abies cephalonica* le rend impropre dès que les gelées tardives deviennent fréquentes, début mai. On peut alors lui préférer *Abies bornmuelleriana* et *Abies nordmanianna*. Pour *Abies alba*, il existe un seuil de sécheresse attendu au-delà duquel il faut mieux l'abandonner. Néanmoins, ce seuil dépend aussi de la sécheresse atmosphérique et de la réserve utile des sols. Un indicateur composite doit pouvoir être construit à partir des résultats de modèle de processus et être appliqué à de larges échelles pour établir des cartographies. Concernant les ressources génétiques intraspécifiques, sur un des sites, nous avons montré un effet négatif de l'altitude des provenances sur la mortalité. Ce site est caractérisé par des hivers froids (Température moyenne de décembre à février de 1,9°C) et peu de sécheresses (Indice de Martonne mensuel moyenne de 29,6 entre juin et août). La principale cause de mortalité semble due, en partie, à l'existence de fourches dues à des gelées tardives qui augmente la probabilité de casse des arbres lors d'épisodes de neiges lourdes. Il est donc normal, pour ces climats, que la recommandation soit de choisir des provenances de haute altitude débourrant plus tardivement.

## Session 3

### Croissance et sylviculture

- Quelles essences favoriser dans les peuplements mélangés réguliers pour augmenter la résistance et la résilience des arbres au climat et à ses aléas ?  
*(François Lebourgeois, AgroParisTech Nancy)*
- Installation et conduite des peuplements de Cèdre pour faire face au changement climatique.  
*(François Courbet, Inra Avignon  
et Michèle Lagacherie, CRPF Languedoc-Roussillon)*
- Sylviculture adaptative pour le sapin pectiné dans l'arrière-pays méditerranéen – Constitution d'un réseau d'essais  
*(Jean Ladier, ONF Avignon)*

## **Quelles essences favoriser dans les peuplements mélangés réguliers pour augmenter la résistance et la résilience des arbres au climat et à ses aléas ? Une étude dendroécologique multi-espèces en contextes collinéen et montagnard.**

*Lebourgeois L., Mérian P., Gomez N., Pinto P., Eberlé P. et Seynave I.  
(AgroParisTech, UMR1092, Laboratoire d'Étude des Ressources Forêt Bois (LERFoB), Nancy)*

L'objectif de ce projet était d'étudier les différences de réactivité au climat du Sapin pectiné et du Hêtre (essentiellement) selon (i) la compétition intraspécifique (appréhendée à travers des indicateurs individuels comme le statut social des arbres et leurs dimensions) ou interspécifique (appréhendée à travers le type et le taux de mélange). La réponse des arbres au climat a été étudiée à partir des cernes d'accroissement radial par une approche de type dendroécologique. Le projet s'est appuyé sur un réseau de 194 placettes (1794 arbres) couvrant tout le gradient climatique des étages collinéen au montagnard dans le massif Vosgien.

Dans le massif vosgien, la croissance radiale des peuplements forestiers est essentiellement sous déterminisme thermique ; les conditions hydriques estivales jouant néanmoins un rôle d'autant plus important que les conditions locales sont chaudes et sèches. Les conditions thermiques du mois d'août apparaissent essentielles car elles stimulent la croissance quels que soient les contextes pris en compte. Le Sapin apparaît cependant plus thermophile que le Hêtre avec également une sensibilité plus forte aux arrière-effets (de l'automne). Pour le Hêtre, ce sont les conditions printanières et du début d'été qui gouvernent la mise en place du cerne.

Le statut social de l'arbre, la présence d'un mélange ou encore son taux (proportion de Sapin dans les peuplements Sapin-Hêtre) modulent

clairement la réponse des arbres, notamment pour le Sapin qui apparaît être l'espèce la plus sensible aux variations de compétition.

L'étude sur le statut social montre que la contrainte climatique ne se répartit pas d'une façon homogène dans le peuplement. Ainsi, plus un arbre est dominant et plus sa sensibilité aux aléas climatiques extrêmes (froids hivernaux intenses, sécheresses exceptionnelles) augmente. Les arbres dominés résistent mieux aux aléas extrêmes mais apparaissent plus dépendant de la température tout au long de la saison de végétation.

Concernant le mélange, sa présence (avec l'Épicéa et/ou le Hêtre) réduit la sensibilité du Sapin à la sécheresse estivale mais seulement sur les situations les plus sèches (altitudes < 600 m et précipitations moyennes de juillet < à 85 mm). Des complémentarités fonctionnelles liées aux différences d'enracinement, d'interception des pluies, de ruissellement le long des troncs ou de développement foliaire peuvent expliquer ces résultats.

L'étude met clairement en évidence l'importance des mélanges pour adapter la gestion aux modifications climatiques en cours.

## Installation et conduite des peuplements de Cèdre pour faire face au changement climatique.

F. Courbet(1), M. Lagacherie(2), P. Marty(2), J. Ladier(3), C. Ripert(4), J. Guillemot(1), E. Klein(1), Ph. Riou-Nivert(5), F. Huard(1), L. Amandier(2), E. Paillassa(5)

(1) INRA (2) CRPF (3) ONF (4) IRSTEA (5) CNPF-IDF

Les modèles d'évolution du climat prévoient que 60 à 80% du territoire selon le scénario seront sous climat méditerranéen au cours de la période 2050-2080 (Roman-Amat, 2007). La région méditerranéenne constitue donc un bon observatoire des conditions climatiques qui règneront majoritairement en France dans un futur proche. Face à cette évolution rapide, les mécanismes adaptatifs qui font appel à la reproduction (adaptation génétique et migration) risquent d'être insuffisants. L'utilisation d'espèces et de pratiques sylvicoles adaptées pour rendre les peuplements moins sensibles à la sécheresse sont deux voies intéressantes à explorer. Dans ce contexte, ce projet avait pour objectif de progresser sur deux questions d'intérêt pratique évident :

- Peut-on étendre, et comment, les reboisements en cèdre, espèce méditerranéenne réputée supporter un certain niveau de sécheresse?
- Quelle sylviculture appliquer aux peuplements de cèdre, actuels et futurs?

Pour avancer sur la première question, le projet a consisté à recueillir, rassembler, synthétiser et transmettre les connaissances disponibles, particulièrement en matière d'autécologie et de reboisement, sur la base de l'expérience acquise, dans et en dehors de la région méditerranéenne, grâce à :

- l'analyse bibliographique d'environ 200 références

- une enquête destinée à rassembler les informations sur les références existantes, enquête lancée auprès des principaux organismes de recherche, développement et gestion
- la rédaction et la diffusion d'une brochure reprenant les connaissances utiles aux gestionnaires

Pour avancer sur la deuxième question, on a cherché à préciser l'influence des opérations sylvicoles (éclaircie et élagage) sur la sensibilité du cèdre au climat et à la sécheresse grâce à l'analyse de données (croissance et état sanitaire) issues de deux dispositifs sylvicoles expérimentaux situés en région méditerranéennes. Le premier situé au mont Ventoux (Sault, à 1150 m d'altitude) teste uniquement l'intensité des éclaircies (4 traitements). Le second, situé dans les garrigues du Gard (Valliguières, à 250 m d'altitude), teste la combinaison intensité d'éclaircie x intensité d'élagage (4 x 4 traitements).

### Principaux résultats de l'enquête

Un total de 196 relevés sont parvenus de 42 départements différents : 106 sont situés en zone méditerranéenne, 69 sous climat océanique et 21 en climat plus continental. L'information recueillie étant très lacunaire, seule une centaine de relevés utilisables ont été regroupés par classe de variables synthétiques. Les performances des peuplements ont été jugées sur leur croissance en hauteur et leur état sanitaire. Les peuplements situés hors zone méditerranéennes sont en général plus productifs. Ils sont aussi plus jeunes empêchant d'apprécier leur adaptation au milieu avec un recul suffisant. L'enquête confirme l'influence des facteurs déjà signalés en région méditerranéenne comme l'inadaptation du cèdre aux sols hydromorphes. Les meilleures productivités se rencontrent sur roche-mère acide (hors granite) alors que le cèdre n'apprécie pas les sols compacts ou à dominance très argileuse. De même, les sols très dominés par les sables grossiers ne lui conviennent pas, à moins d'être très profonds.

## Principaux résultats du volet recherche

(1) *Influence de l'éclaircie et de la densité sur la relation croissance climat (Sault)*

Un modèle mixte permet de séparer les effets fixes (densité, statut social, taille des arbres) des effets aléatoires qui nous intéressent : effet année lié au climat, interaction densité x année,...

L'examen des effets aléatoires a permis de mettre en évidence une plus grande sensibilité des arbres dominants au climat quand le seuil de densité passait à 550 tiges à l'hectare ou moins.

La variabilité annuelle de la croissance, purgée des effets fixes, est corrélée positivement avec les précipitations et négativement avec les températures moyennes des mois de la période de végétation (mars à juillet).

L'effet négatif des mauvaises années est moins marqué lors des éclaircies fortes qui abaissent la densité à 550 tiges/ha, mais seulement si cette mauvaise année intervient dans les 2-3 ans après l'éclaircie.

Cet effet se prolonge pendant 5 ans seulement sur les arbres dominants et pour l'éclaircie la plus forte, ramenant la densité à 550 tiges à l'hectare ou moins.

L'interaction entre la densité et le climat n'a un effet significatif que pour les seuls dominants et codominants : la diminution de la densité atténue l'effet des mauvaises années et tire corrélativement moins parti des bonnes années. Cet effet est significatif lorsqu'on prend en compte l'ensemble du gradient de densité, allant de 55 m<sup>2</sup> à 15 m<sup>2</sup> de surface terrière par hectare.

(2) *Influence de l'éclaircie et de l'élagage sur l'état sanitaire (Valliguières)*

Le taux de mortalité est insuffisant pour identifier des effets significatifs des traitements. Par contre, les arbres ont été affectés par des écoulements de résine, attribuables à la sécheresse, de façon très différenciée selon les traitements. Ceux-ci semblent bien avoir eu un

effet sur la proportion d'arbres atteints mais pas sur la gravité des symptômes des seuls arbres affectés.

En l'absence d'élagage, les arbres éclaircis sont plus atteints. Il y a une forte interaction élagage x densité car les résultats s'inversent pour l'élagage le plus intensif. L'élagage diminue le taux d'arbres atteints particulièrement dans la modalité la plus éclaircie.

L'élagage artificiel de branches vertes associé à des éclaircies fortes rendraient les arbres moins sensibles à la sécheresse. Ces résultats nécessitent néanmoins d'être confirmés.

Une brochure (Courbet et *al.*, 2012) a été publiée et est en voie de diffusion auprès des principaux organismes forestiers. Elle rassemble les éléments de connaissances disponibles issues de la bibliographie et de l'enquête, permettant au gestionnaire d'installer et de conduire ses peuplements en connaissance de cause :

- autécologie, comportement vis-à-vis des facteurs climatiques et des caractéristiques du sol
- recommandations techniques pour l'installation des peuplements
- indications et éléments de choix sur les itinéraires sylvicoles
- caractéristiques et utilisations du bois
- risques sanitaires
- références bibliographiques

### **Références Bibliographiques**

Courbet F., Lagacherie M., Marty P., Ladier J., Ripert C., Riou-Nivert P., Huard F., Amandier L., Paillassa É. 2012 *Le cèdre en France face au changement climatique : bilan et recommandations*. 32 p.

Roman-Amat B., 2007. *Préparer les forêts au changement climatique. Rapport à MM. Les Ministres de l'Agriculture et de la Pêche, et de l'écologie, du Développement et de l'Aménagement Durables*. 125 p.

## **Sylviculture adaptative pour le sapin pectiné dans l'arrière-pays méditerranéen Constitution d'un réseau d'essais**

*Jean Ladier (ONF-Département R&D, Avignon)*

### **Contexte et objectifs**

Les gestionnaires forestiers sont actuellement démunis face aux dépérissements inquiétants constatés dans les sapinières méridionales et au diagnostic pessimiste sur leur avenir. Conscients que le *statu quo* n'est pas une bonne solution, ils ont besoin de scénarios de gestion pour mener ces peuplements à maturité avant de les renouveler.

La réduction de la surface foliaire reste la principale préconisation pour adapter rapidement les peuplements en place à un déficit hydrique récurrent. Cependant, ce principe général n'a pas été mis en œuvre dans le sud de la France et suscite des questions sur sa pertinence dans un contexte de gestion extensive.

Nous proposons d'expérimenter la sylviculture à faible densité pour les sapinières méridionales en implantant deux essais dans des peuplements en situation critique dans les Alpes du Sud. Ces essais seront mis en réseau avec les autres dispositifs compatibles en région méditerranéenne française.

Le projet est mené par l'ONF en collaboration avec la forêt privée (CRPF de PACA et de Languedoc-Roussillon) l'INRA d'Avignon et le DSF Sud-Est.

### **Facteur étudié et types de résultats attendus**

Nous comparons des niveaux de densité des sapinières, avec trois (si possible) ou deux (à défaut) modalités tranchées : densité "normale" correspondant à la gestion courante (témoin), densité faible, densité très faible.

Les observations portent sur l'évolution de la croissance et surtout, de la santé du peuplement :

- croissance du peuplement : évolution de la surface terrière, sur la base d'un inventaire en plein, suivi individuel en diamètre et hauteur de 40 arbres par modalité,
- développement du sous-bois dont la régénération naturelle du sapin : phytovolume et composition, comptage des semis
- bilan hydrique : réserve utile, précipitations et surface foliaire
- la santé des arbres : observation du houppier de 12 à 20 individus parmi les 40 suivis individuellement

### **Nouveaux dispositifs installés**

Le succès de l'expérimentation dépend en grande partie du choix des sites, qui doivent présenter des caractéristiques écologiques et sylvicoles précises pour permettre l'implantation des modalités et mettre en évidence les différences entre traitements. Ces multiples contraintes d'installation se sont avérées difficiles à respecter avec pour conséquences principales l'impossibilité d'implanter trois modalités et un retard par rapport au calendrier prévu.

Un essai a été installé dans les Préalpes du Sud, en FD de l'Issole, en limite inférieure du montagnard moyen. Le second se trouve dans les Alpes-Maritimes, en FD de Clans, en climat montagnard inférieur, avec une mesure initiale qui ne pourra être faite qu'en fin d'hiver. Tous deux présentent une modalité "densité très faible" et une modalité "témoin".

### **Réseau d'essais**

Un dispositif similaire a été installé par l'ONF en début d'année dans le département de l'Aude, dans la sapinière du pays de Sault. Il est composé de deux blocs à deux modalités.

Hormis cet essai, aucun dispositif compatible n'existe en région Provence-Alpes-Côte-d'Azur et Languedoc-Roussillon. Le réseau d'essais

regroupe donc quatre sites (tableau ci-dessous), avec des protocoles de mesure et de suivi communs, qui seront mesurés tous les deux ans pendant au moins six ans.

Essai	Date installation	Age	Ho	N/ha	G/ha
D Issole (04)	fin 2012	95	19	800 / 400	36 / 18
D Clans (06)	début 2013	(FIR)	(FIR)	330 / 240	41 / 18
D Picaussel (11) bloc 1	début 2012	75	25,5	400 / 200	47 / 20
D Picaussel (11) bloc 2	début 2012	55	24,7	400 / 200	42 / 21

### Valorisation

Un rapport est prévu après 4 ans pour diffuser des résultats intermédiaires.

Ces expérimentations ont en outre vocation à être des placettes de démonstration. Ainsi, le dispositif de Picaussel sera visité en 2013 dans le cadre d'une journée technique organisée par le CRPF.

# Session 4

## Économie

- En quoi l'analyse économique permet-elle d'informer les choix de gestion sous incertitude climatique ?  
Étude pilote sur le cas du Douglas  
*(Marielle Brunette, AgroParisTech Nancy/Inra et Nathalie Bréda, Inra Nancy)*

## **En quoi l'analyse économique permet-elle d'informer les choix de gestion sous incertitude climatique ?**

### **Étude pilote sur le cas du Douglas**

*Marielle Brunette (AgroParisTech Nancy/Inra et Nathalie Bréda (Inra Nancy)*

La longueur de la période d'investissement, la réversibilité et la plasticité limitée des décisions font de la forêt un cadre prioritaire pour étudier les options d'adaptation. Une forêt plantée aujourd'hui arrivera à maturité pour être exploitée dans 30 à 100 ans en fonction de l'essence. Même si de nombreuses incertitudes demeurent, les grandes tendances sur l'évolution du climat font consensus dans la communauté scientifique et il semble acquis que le régime des aléas naturels, et en particulier des événements extrêmes, sera modifié. Dans ce contexte, de nombreuses actions d'adaptation anticipatives sont préconisées, parmi elles la réduction des périodes de rotation. L'idée sous-jacente est que réduire la période de rotation permet de diminuer la durée d'exposition du peuplement aux aléas naturels (tempête, incendie, sécheresse...) et de réduire la vulnérabilité des arbres en réduisant l'âge et la hauteur, facteurs qui les rend moins sensibles au vent et plus aptes à réagir aux effets des aléas biotiques et aux sécheresses.

Cette stratégie d'adaptation fait débat au sein de la population des propriétaires forestiers, car elle a de nombreuses conséquences en termes de produits mis sur le marché du bois, de stockage de carbone ou encore de maintien de la fertilité à long terme, par exemples. Ainsi, les propriétaires s'interrogent sur les coûts et bénéfices d'une telle stratégie, sur son acceptabilité économique. L'objectif du projet présenté ici était d'apporter des pistes de réflexion en intégrant le risque de perte de production et de dépérissements induits par la sécheresse dans l'évaluation du bilan économique d'une réduction des périodes de rotation.

Nous considérons un propriétaire forestier qui gère deux peuplements de Douglas, avec une rotation de 55 ans et qui vient de réaliser une coupe rase. Les deux peuplements sont soumis au même climat, mais sont installés sur des sols à réserves en eau contrastées. Conscient du risque de dépérissement qui affectera sa région, le propriétaire hésite entre trois stratégies qui s'offrent à lui. La stratégie 1 consiste à poursuivre la gestion actuelle en replantant du douglas avec une période de rotation de 55 ans. La stratégie 2 consiste en une adaptation immédiate de la gestion en adoptant une période de rotation de 40 ans. La stratégie 3 est une stratégie intermédiaire consistant à conserver la période de rotation en 55 ans pour encore une rotation et ensuite d'adopter la rotation en 40 ans pour toutes les rotations futures.

L'objectif de ce projet était de comparer économiquement chacune de ces stratégies en prenant en compte le risque de dépérissement induit par la sécheresse. Pour évaluer l'aléa sécheresse sous climat futur, nous avons retenu un scénario moyen d'émission de gaz à effets de serre (A1B) et un modèle climatique (Arpège, Météo-France). Pour une région donnée, la plus grande incertitude sur le climat futur est liée à la méthode de descente d'échelle. Cette incertitude a été prise en compte ici en réalisant les calculs de bilans hydriques à l'aide de l'outil Biljou© avec 4 réalisations possibles de climat futur régional. Les calculs ont été réalisés pour trois fenêtres temporelles : passé récent (1970-2006), futur proche (autour de 2050) et futur lointain (autour de 2100). Nous avons ainsi obtenu 4 séries de déficit hydrique du sol de 1970 à 2100.

Pour chacune de ces séries et chaque fenêtre temporelle, nous avons ensuite calculé la probabilité d'occurrence de deux sécheresses consécutives susceptibles d'induire un dépérissement de Douglas. Ce seuil de vulnérabilité a été établi dans le cadre du projet de recherche DRYADE. Cette probabilité d'occurrence a ensuite été introduite dans le calcul économique, en utilisant pour chaque fenêtre temporelle la

probabilité minimale et maximale obtenue à partir des quatre scénarios de climat futur régionalisé.

Pour comparer nos trois stratégies dans un contexte d'aléa sécheresse accru, nous utilisons un critère standard de l'économie forestière, le Bénéfice Actualisé en Séquence Infini (BASI). Le BASI permet de comparer des itinéraires sylvicoles de durées différentes en les ramenant à une durée commune, l'infini.

L'hypothèse posée est la suivante : la réduction de la période de rotation en 40 ans permet de s'adapter parfaitement au climat actuel et futur, donc le BASI associé à cette stratégie est indépendant des probabilités d'occurrence de l'aléa sécheresse. En revanche, les deux autres stratégies en dépendent. Plus précisément, nous considérons que la probabilité de subir une sécheresse durant la première rotation (probabilités pour l'intervalle de temps (2020-2059)) est plus faible que celle de subir une sécheresse durant les rotations futures (probabilités pour l'intervalle de temps (2070-2100)). De plus, nous considérons que l'occurrence de l'aléa se traduit par une perte de bénéfices (via une perte d'accroissement en volume et une réduction du prix des arbres dépérissants).

Dans ce contexte, nous montrons que, d'un point de vue économique, la stratégie assurant le meilleur bénéfice semble être la stratégie 2, i.e. celle consistant à s'adapter immédiatement. Ensuite, parmi les stratégies 1 et 3, celle générant le BASI le plus élevé est la stratégie 3 qui suggère d'attendre une rotation supplémentaire avant de réduire la période de rotation. En conclusion, la stratégie 1 d'absence d'adaptation représente la plus mauvaise stratégie économique pour le propriétaire forestier. Ce projet a également permis d'illustrer la sensibilité à l'incertitude climatique de l'évaluation économique des stratégies. L'incertitude climatique se propage dans les modèles d'impacts biophysiques puis les modèles économiques et donc jusqu'à

la prise de décision d'action. En pratique, ces modèles d'impacts visent à éclairer la décision du propriétaire en bornant l'amplitude des possibles.