



# **Action COST FP0703 – ECHOES**

*Expected Climate change and Options for  
European silviculture*

## **Rapport national**

## **France**

30 juillet 2009

Emmanuel CACOT  
Jean-Luc PEYRON

# Table des matières

<b>Introduction</b>	<b>3</b>
Encadré 1 : Brève description des forêts françaises	4
<b>1. Les impacts</b>	<b>6</b>
<b>1.1. Les impacts observés</b>	<b>6</b>
1.1.1. L'évolution climatique observée	6
1.1.2. Les impacts sur la dynamique et le fonctionnement des écosystèmes	7
1.1.2.1. La phénologie des plantes	7
1.1.2.2. Les aires de répartition des plantes	9
1.1.2.3. Les insectes, parasites et agents pathogènes	9
1.1.2.4. La productivité générale	11
1.1.3. Les perturbations et les événements climatiques extrêmes	12
1.1.3.1. Les tempêtes de 1999 et 2009	12
1.1.3.2. La sécheresse et la canicule de 2003	12
1.1.3.3. Le coût des impacts	14
<b>1.2. Les impacts attendus</b>	<b>14</b>
1.2.1. L'évolution climatique attendue	15
1.2.2. Les impacts sur la dynamique et le fonctionnement des écosystèmes	16
1.2.2.1. La phénologie des plantes	16
1.2.2.2. Les aires de répartition des plantes	16
1.2.2.3. Les insectes, les parasites et les agents pathogènes	17
1.2.2.4. La productivité générale	18
1.2.3. Les perturbations et les événements climatiques extrêmes	19
1.2.4. Le coût des impacts futurs	20
<b>1.3. Le suivi des impacts</b>	<b>20</b>
1.3.1. Les dispositifs et réseaux de suivi de fond	20
1.3.2. Les dispositifs de veille spécifiques	21
<b>1.4. La gestion des impacts</b>	<b>22</b>
<b>2. L'adaptation</b>	<b>24</b>
<b>2.1. La vulnérabilité des forêts au changement climatique</b>	<b>24</b>
<b>2.2. La stratégie et les politiques générales en matière d'adaptation</b>	<b>25</b>
<b>2.3. Les mesures d'adaptation forestières</b>	<b>26</b>
2.3.1. Le niveau politique	26
2.3.2. Le niveau de la gestion	27
2.3.2.1. Les forêts publiques	27
2.3.2.2. Les forêts privées	29
<b>2.4. La recherche en matière d'adaptation</b>	<b>30</b>
<b>3. L'atténuation</b>	<b>32</b>
<b>3.1. La comptabilisation du carbone</b>	<b>32</b>
3.1.1. Le Protocole de Kyoto et la position de la France	32
3.1.2. La comptabilisation du carbone en France	33
<b>3.2. Processus politiques, instruments et stratégies pour l'atténuation</b>	<b>34</b>
<b>3.3. La foresterie comme source de bio-énergie</b>	<b>35</b>
<b>3.4. La recherche en matière d'atténuation</b>	<b>37</b>
<b>4. Conclusion</b>	<b>39</b>
<b>Références bibliographiques</b>	<b>40</b>
<b>Annexe 1</b>	<b>45</b>

## Introduction

Les forêts françaises s'inscrivent dans des contextes biogéographiques et institutionnels divers ; en grande partie modifiées par l'homme au fil du temps, elles sont aujourd'hui parmi les plus étendues d'Europe (Encadré 1). Depuis environ une quarantaine d'années, on y observe des changements dans les conditions de croissance, induits par des facteurs à la fois multiples et variables dans le temps. Des signes de dégradation ont commencé à être observés entre les années soixante-dix et quatre-vingts, par exemple dans les secteurs montagneux du nord-est du pays. Si la pollution atmosphérique fut tout d'abord incriminée, des recherches ciblées mirent également en évidence le rôle majeur de la sécheresse de l'année 1976. Ces événements ont encouragé les pouvoirs publics à mettre en place un suivi quantitatif des ressources et de l'état sanitaire des forêts.

Interpellé par les causes historiques de ce déclin, Becker (1987) lança des analyses dendrochronologiques, tout d'abord sur le sapin, puis sur plusieurs espèces de feuillus et de résineux. Il eut la surprise de constater que les cernes annuels ne se resserraient pas, qu'ils s'étaient élargis, au contraire, tout au long du siècle précédent. Au nombre des raisons susceptibles d'expliquer cette augmentation de la productivité, les trois principales étaient des dépôts d'azote, le réchauffement planétaire et la hausse de la concentration atmosphérique en dioxyde de carbone. Bien que les contributions de ces deux derniers facteurs fussent pratiquement inconnues pour les périodes passées, elles illustraient la capacité des forêts à atténuer le changement climatique.

Entre 2001 et 2004, le projet de recherche CARBOFOR (Lousteau [coordinateur], 2004) s'était donné pour objectif, ainsi que l'indique son titre, d'analyser ce rôle d'atténuateur. Cependant, il s'est également intéressé de près à la manière avec laquelle les forêts pourraient être modifiées par le changement climatique. La publication des cartes montrant le déplacement, au cours du 21<sup>ème</sup> siècle (paragraphe 1.2.2.2), de l'aire de répartition potentielle de plusieurs groupes écologiques forestiers et des principales essences selon un scénario modéré (B2) a frappé beaucoup de forestiers français par la variété des phénomènes mis en jeu. L'impact de cette publication a été d'autant plus fort qu'elle est intervenue dans le sillage de deux événements particulièrement marquants : les tempêtes de 1999 qui ont frappé les deux-tiers du pays en mettant à bas environ 8% des volumes sur pied, et la sécheresse et la canicule de 2003 qui, sévissant sur une grande partie de l'Europe, ont entraîné une grave surmortalité, de vastes feux de forêts et une diminution significative de la croissance des arbres qui y avaient rattrapé.

Il s'en est suivi une nouvelle prise de conscience des impacts possibles du changement climatique sur les forêts françaises, qui a suscité plusieurs initiatives pour répondre aux interrogations des gestionnaires forestiers, amorcer une adaptation de la gestion forestière et repérer les lacunes dans les connaissances. Dans cette perspective, des points stratégiques ont été définis par plusieurs auteurs, dont notamment Roman-Amat (2007), rédacteur d'un rapport spécial à la demande des Ministères chargés de l'Agriculture et de l'Ecologie. Ces points clés, y compris celui de l'atténuation des impacts, ont par ailleurs été discutés dans le cadre de l'approche participative sur l'environnement qui a été décidée en 2007 par le Président français, organisée par le Ministère chargé du Développement Durable et baptisée le « Grenelle de l'Environnement ».

Enfin, les forêts ont généralement été conduites en tablant sur une croissance future et un contexte économique et environnemental relativement stable. Si les tendances passées invalident déjà ces postulats, le changement climatique ajoute des raisons supplémentaires de prendre explicitement en compte les évolutions, la variabilité, les opportunités, les incertitudes et les inconnues.

## Encadré 1 : Brève description des forêts françaises

La France métropolitaine se tient au carrefour de quatre régions biogéographiques (atlantique, alpine, continentale et méditerranéenne). Cette diversité doit être prise en compte pour l'étude des impacts du changement climatique et pour la mise en oeuvre des stratégies d'adaptation et d'atténuation.

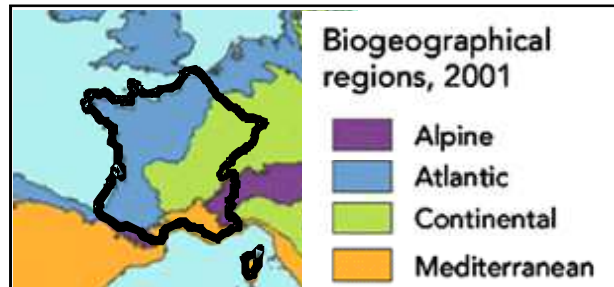


Figure1 : Les régions biogéographiques en France (d'après l'Agence Européenne pour l'Environnement, 2001).

Il n'existe pratiquement aucune forêt naturelle en France métropolitaine. La plupart des zones boisées ont été exploitées plus ou moins intensivement par les hommes depuis leur ré-extension après la dernière période glaciaire. Il en résulte que les forêts sont soit subnaturelles, soit plantées par l'homme. Les forêts subnaturelles sont généralement plus variées (en espèces, en classes d'âge et en structure générale) et présentent des cycles plus longs.

Les forêts françaises comptent parmi les plus vastes d'Europe :

- Elles couvrent environ 16 millions d'hectares (ha), soit 28% du territoire national ;
- Les volumes sur pied approchent les 2,3 milliards de mètres cubes (m<sup>3</sup>) de bois fort, soit environ 160 m<sup>3</sup>/ha ;
- L'accroissement annuel en volume atteint environ 100 millions m<sup>3</sup> de bois fort, soit 6 à 7 m<sup>3</sup>/ha/an en moyenne ;
- La fixation nette de carbone correspondante dépasse les 80 millions de tonnes d'équivalents-CO<sub>2</sub> par an ;
- Le prélèvement de bois rond pour l'industrie ou le chauffage domestique est estimé aux deux tiers de l'accroissement annuel en volume, le tiers restant entraînant la croissance rapide du matériel sur pied et expliquant la contribution significative des forêts à la fixation annuelle de carbone.

Outre la partie européenne de son territoire, la France comprend des territoires d'outre-mer dont les surfaces boisées dépassent 9 millions d'hectares<sup>1</sup>. Le plus remarquable d'entre eux est la Guyane française, avec 8 millions d'hectares de forêt équatoriale et un matériel sur pied équivalent à celui des forêts de la métropole<sup>2</sup>. Cependant, du fait de particularités qui les distinguent très nettement des régions européennes, ces territoires d'outre-mer ne sont pas traités dans la partie principale de ce rapport.

Si les forêts métropolitaines françaises sont variées sur le plan biogéographique, elles le sont également sur le plan institutionnel. Plus d'un quart des surfaces boisées appartiennent à des institutions publiques, dont l'Etat et plus de dix mille communes. Les trois-quarts (ou

<sup>1</sup> Mayotte 5 000 ha, Réunion 84 000 ha, Wallis et Futuna 6 000 ha, Nouvelle Calédonie 717 000 ha, Polynésie française 105 000 ha, Guadeloupe 80 000 ha, Martinique 47 000 ha, Guyane française 8 063 000 ha, Saint-Pierre-et-Miquelon 3 000 ha (d'après « Situation of the world forests 2005 », FAO/ECE).

<sup>2</sup> 2 822 million m<sup>3</sup>, soit 350 m<sup>3</sup>/ha.

presque) restent des forêts privées, pour la plupart non industrielles et réparties entre 3,5 millions de propriétaires, dont les deux tiers sont des particuliers et plus de cinquante pour cent des retraités. Comme la foresterie n'est en général pas l'activité principale de ces propriétaires, les politiques forestières jouent un rôle déterminant pour stimuler la gestion durable de ces espaces par la réglementation, les incitations et l'aide technique.

# 1. Les impacts

Les **impacts observés** sont à la base de l'identification et de la compréhension des problèmes. Ils permettent des simulations pour prévoir les **impacts attendus**. Le suivi des forêts est le meilleur moyen de détecter et d'étudier les impacts ; son amélioration constitue de ce fait un véritable enjeu pour mieux recenser, comprendre et prévoir les **conséquences du changement climatique**. Certains impacts apparaissent progressivement au fil des évolutions et peuvent être pris en compte au fur et à mesure. De nombreux autres, toutefois, se manifestent à l'occasion d'événements extrêmes (tempêtes, inondations, sécheresses, épidémies, etc.) qui sont à l'origine de situations de crise. Une **gestion de crise** doit par conséquent être mise en œuvre dans le sillage immédiat de l'événement, et doit également être anticipée longtemps à l'avance.

Dans cette optique, ce chapitre traite successivement des impacts observés (passés et présents), attendus (futurs), de leur suivi et de la gestion d'urgence des impacts extrêmes.

## 1.1. Les impacts observés

Dans cette section, les faits décrits sont probablement liés au forçage par les radiations et au changement climatique, mais également à plusieurs autres phénomènes dont en particulier les dépôts d'azote (paragraphe 1.1.2.4). Un des principaux défis de la recherche est ainsi de relier avec plus de précision ces manifestations aux forces motrices qui pourraient en être à l'origine. Il s'agit là d'une étape nécessaire pour pouvoir ensuite élaborer des modèles visant à prédire les changements à venir. Mais ces relations de cause à effets sont souvent teintées d'incertitude – un problème qui sera discuté partout où cela sera possible.

### 1.1.1. L'évolution climatique observée

Le changement climatique étant l'un des principaux moteurs des évolutions qui se dessinent au sein des peuplements forestiers, de leur flore et de leur faune, celui-ci sera présenté en premier (d'après Moisselin et al., 2002).

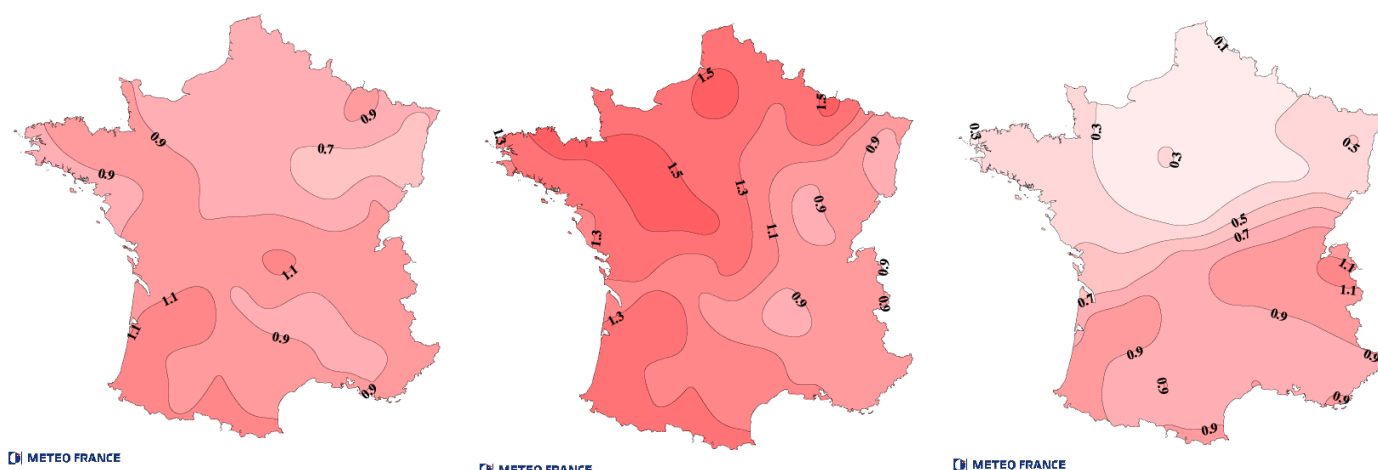


Figure 2 : Augmentation observée, en °C, de la température annuelle moyenne (à gauche), de la température minimale (au centre) et de la température maximale (à droite) entre 1901 et 2000 (source : Météo-France).<sup>3</sup>

<sup>3</sup> <http://imfref.mediasfrance.org/web/resultats/index>

L'accroissement moyen de la température en France au cours du siècle passé a été compris entre +0,7 et +1,1°C, ce qui est supérieur à la hausse enregistrée à l'échelle planétaire (+0,7°C). Cette augmentation correspond à un glissement du climat de 180 km en moyenne vers le nord. Elle concerne plus la moyenne des températures minimales (de +0,7 à +1,7°C, avec un pic en été) que celle des températures maximales (+0 à +1,3°C) et varie d'une région à l'autre (+1,1°C dans la région sud-ouest, un peu moins ailleurs - Figure 2 ci-dessus). On relève une chute spectaculaire de l'amplitude journalière (différence entre les températures maximale et minimale), notamment dans le nord du pays.

En ce qui concerne les précipitations, la pluviométrie moyenne s'est accrue de 0,5 à 1% par décennie, à l'exception, non statistiquement significative, du sud du pays. Des contrastes sont apparus entre le sud et le nord : l'indice de De Martonne<sup>4</sup> met en évidence des zones sèches localisées dans le sud, alors que dans le nord l'augmentation des précipitations et des températures génèrent un climat plus humide.

Les contrastes saisonniers sont plus marqués : les étés se sont plus réchauffés que les hivers, et les précipitations hivernales se sont accrues de manière significative dans un tiers des cas, tandis que les précipitations estivales ont décliné mais de manière non significative.

### **1.1.2. Les impacts sur la dynamique et le fonctionnement des écosystèmes**

Les impacts sur la dynamique et le fonctionnement des écosystèmes ne comprennent pas les effets des événements extrêmes, qui seront traités plus loin. Ils influencent la phénologie et les aires de répartition de la flore et de la faune, ainsi que la productivité générale.

#### **1.1.2.1. La phénologie des plantes**

A l'instar du secteur agricole, où de longues séries chronologiques ont été constituées - par exemple pour les pommiers (Seguin, 2007) et la vigne - et montrent une évolution très significative des dates de récolte (Chuine *et al.*, 2004), la phénologie de la végétation forestière est étudiée dans le contexte du changement climatique, avec à la clé un certain nombre de résultats intéressants. Contrairement à d'autres impacts sur la dynamique et le fonctionnement des écosystèmes qui sont influencés par le réchauffement planétaire et par d'autres modifications de l'environnement (tels que les dépôts d'azote), le changement climatique est le seul facteur pouvant expliquer les évolutions observées de la phénologie.

Une étude des peuplements du réseau Renécofor (parcelles de niveau 2 du réseau de surveillance européen) a été menée récemment, sur la période 1997-2006, afin de modéliser la relation entre des paramètres géographiques et climatiques d'une part, et les stades phénologiques d'autre part (Lebourgeois *et al.*, 2008). La modélisation souligne l'influence de paramètres climatiques telles que les conditions météorologiques printanières et automnales (évapotranspiration de Turc<sup>5</sup> et/ou température en mars et en octobre) sur les stades phénologiques (débourement des bourgeons, jaunissement, etc.). Un accroissement de 10 mm de l'évapotranspiration potentielle en mars fait avancer le débourement de 4 à

---

<sup>4</sup> Indice de De Martonne (mm/°C) =  $P/(T+10)$ , P étant les précipitations annuelles (mm) et T la température annuelle moyenne (°C). Plus cet indice est élevé, plus le climat est humide.

<sup>5</sup> Pour une humidité relative > 50% (moyenne mensuelle), l'évapotranspiration potentielle de Turc (mm/mois) =  $0,40(T/(T+15))(R_g+50)$ , T étant la température moyenne mensuelle (°C) et  $R_g$  le rayonnement global (cal/cm<sup>2</sup>/jour).

Pour une humidité relative < 50% (moyenne mensuelle), l'évapotranspiration potentielle de Turc (mm/mois) =  $0,40(T/(T+15))(R_g+50)(1+(50-H_r)/70)$ ,  $H_r$  étant l'humidité atmosphérique relative (%).

9 jours selon les espèces. Pour ce qui est des températures, une augmentation de 1°C en mars fait avancer le débourrement des bourgeons de 2 à 5 jours.

Une analyse des dates de feuillaison chez les principales essences forestières a montré que ce stade est devenu de plus en plus précoce au rythme moyen de 2,9 jours par décennie depuis 1950 chez les espèces de la zone tempérée, avec quelques variations d'une espèce à l'autre (projet CARBOFOR, coordonné par Lousteau, 2004). L'étude des phénophases des arbres montre que la date de feuillaison, la durée de la saison de végétation et la date de jaunissement des feuilles ont évolué au cours des dernières décennies.

Un projet en cours prévoit de créer une base de données générale et d'étendre le réseau des observations phénologiques. Ce projet concerne principalement, mais pas seulement, la foresterie (Système d'information phénologique pour la gestion et l'étude des changements climatiques, SIP-GECC). Cette base de données n'a pas encore donné lieu à des analyses.

En outre, certaines données qui n'avaient à l'origine pas été collectées en vue d'étudier le changement climatique peuvent désormais être utilisées à cette fin. Des données existent ainsi depuis 1979 concernant 50 clones de Douglas (*Pseudotsuga menziesii*) et certains croisements contrôlés (J.-C. Bastien, communication personnelle). Les croisements contrôlés doivent être effectués à un stade particulier du développement de la fleur femelle. Si la date des premiers croisements (le premier clone) est très variable, celle des derniers (le dernier clone) l'est moins et peut être utilisée comme référence. Cette seconde date devient de plus en plus précoce : en 24 années de suivi, les derniers croisements contrôlés ont pris de 17 à 18 jours d'avance (Figure 3). L'analyse devrait être affinée pour notamment estimer l'effet des différents clones, mais des observations semblables ont également été réalisées par ailleurs sur le mélèze (*Larix decidua*).

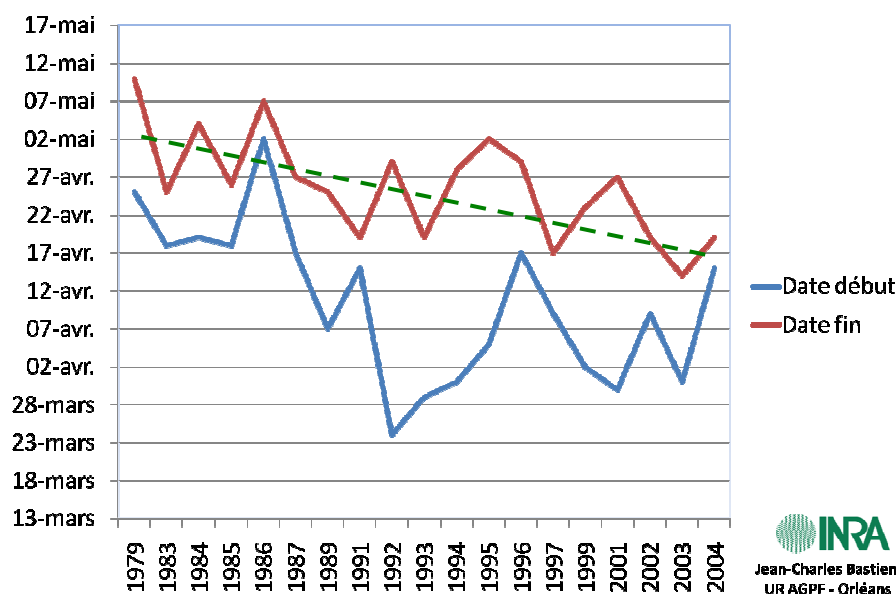


Figure 3 : Dates des croisements contrôlés de mars, avril et mai chez le douglas. En bleu (en bas), les dates des premiers clones ; en rouge (en haut), les dates des derniers clones ; en vert, la tendance générale des dates des derniers croisements contrôlés (J.-C. Bastien, INRA, communication personnelle).

D'autres données sont certainement susceptibles d'être utilisées, telles que celles qui concernent la production de glands ou de faînes et ses conséquences sur la régénération naturelle, mais leur synthèse reste à faire.



### 1.1.2.2. Les aires de répartition des plantes

Avec le réchauffement climatique, la végétation est sensée se déplacer vers des latitudes et des altitudes plus élevées. Dans le cas de la hausse des températures qui a été constatée jusqu'à présent, essentiellement sur une période relativement courte d'environ trois décennies, les déplacements en altitude ont certainement été les plus faciles à repérer et à décrire.

Beaucoup d'observations empiriques sont réalisées sur les aires de répartition de diverses espèces. Des phénomènes de dépérissement sont constatés par exemple chez le hêtre (*Fagus sylvatica*) à Chizé (Centre-Ouest), le Douglas (*Pseudotsuga menziesii*) dans la Montagne Noire (Sud), le pin sylvestre (*Pinus sylvestris*) dans les Alpes méditerranéennes, etc. Les raisons n'en sont pas encore totalement élucidées, mais le changement climatique pourrait s'avérer un facteur majeur.

La répartition altitudinale de 171 espèces végétales forestières a été comparée entre les années 1905, 1985, 1986 et 2005 sur l'ensemble du gradient d'altitude (de 0 à 2600 m) en France, et plus particulièrement dans les Alpes occidentales, le nord des Pyrénées, le Massif Central, le Jura occidental, les Vosges et le massif corse (Lenoir *et al.*, 2008). Ces comparaisons ont montré que le réchauffement climatique a entraîné un glissement vers le haut statistiquement significatif de 29 m en moyenne par décennie de l'altitude optimale des espèces. Ce déplacement vertical est plus important chez les espèces inféodées aux habitats montagnards et chez les herbacées, qui présentent un renouvellement plus rapide des populations. Cette étude montre que le changement climatique agit non seulement sur les marges des aires de répartition des espèces végétales, ainsi qu'il a déjà été démontré ailleurs, mais encore sur le noyau même de ces aires. De la même manière, Vennetier (2005) a relevé une élévation de 150 m de la répartition du pin d'Alep (*Pinus halepensis*) au cours du dernier siècle dans le massif de la Sainte Baume (zone méditerranéenne).

Selon Dupouey *et al.* (2005), les effets du réchauffement climatique sur les aires de répartition des végétations restent mineurs au regard des autres bouleversements qui affectent les milieux forestiers : pluies acides, dépôts d'azote, accroissement du matériel sur pied, boisement naturel et anthropique, intensification des pratiques sylvicoles, introductions accidentelles et volontaires de nouvelles espèces, etc. Tous ces facteurs ont certainement eu ensemble un effet supérieur à celui du réchauffement planétaire sur la dynamique de la végétation. Par exemple, les espèces océaniques sont favorisées par les apports d'azote, tandis que par ailleurs ces dépôts azotés (provenant de l'agriculture, des industries et des transports) se déplacent d'ouest en est, depuis les zones de basse altitude jusqu'aux barrières montagneuses. Ce phénomène pourrait expliquer, du moins en partie, le glissement des étages de végétation vers des altitudes plus élevées dans les montagnes françaises.

### 1.1.2.3. Les insectes, parasites et agents pathogènes

Avec le réchauffement climatique, on observe chez les parasites une augmentation du nombre de générations par an et un développement de l'aire de répartition vers le nord. Ainsi, durant la sécheresse de 2003, des coléoptères des écorces tels que *Ips typographus* et *Pityokteines curvidens* sont-ils parvenus à produire une génération de plus, provoquant de graves dégâts (Nageleisen, 2004 ; OFEFP, 2005 ; cités par Candéau, 2008). Chez certaines autres espèces qui ont habituellement besoin de plusieurs années pour compléter leur cycle, ce dernier est devenu plus court, voire annuel, ce qui entraîne également des pullulations et d'importantes déprédations (Battisti *et al.*, 2000 ; cité par Candéau, 2008).

Un des exemples les plus connus<sup>6</sup> est celui de **la chenille processionnaire du pin** (*Thaumetopoea pityocampa*), qui progresse vers des altitudes plus élevées dans les Alpes (49,7 m/décennie, déplacement vers le haut significatif), les Pyrénées et le Massif Central. Elle s'est également étendue vers le nord au cours des 30 dernières années (27,1 km/décennie dans le Bassin Parisien, avec un pic à 55,6 km/décennie au cours de la période 1994-2004) (Figure 4). Il a été établi que les larves sont désormais capables de survivre en hiver du fait de l'augmentation des températures minimales. Il reste que les hautes températures de 2003 ont, par contre, entraîné une surmortalité des œufs de ce ravageur.

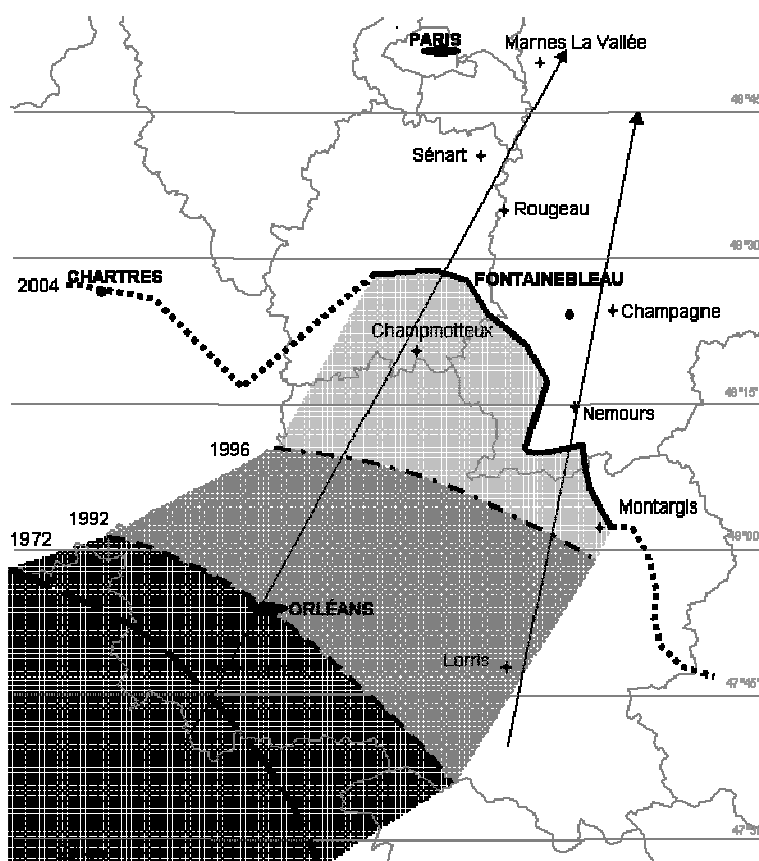


Figure 4 : Extension de l'aire de répartition de la chenille processionnaire du pin vers le nord au cours des 30 dernières années dans le Bassin Parisien.

Des observations existent également sur des espèces envahissantes telles que certains papillons<sup>7</sup> : le petit monarque (*Danaus chrysippus*), le brun des pélargoniums (*Cacyreus marshalli*, parasite des géraniums et des pélargoniums) et la mineuse du marronnier (*Cameraria ohridella*, parasite du marronnier *Aesculus hippocastanum*). Tous ces papillons originaires d'Afrique sont aujourd'hui présents dans le sud de la France (Lhonoré et Bouget, 2003).

Pour ce qui est des agents pathogènes, la confrontation d'observations réalisées dans les années soixante-dix (Lanier *et al.*, 1976 ; cité par Marçais et Desprez-Loustau, 2007) avec la base de données plus récente du Département de la Santé des Forêts (Ministère de l'Agriculture) montre le développement des maladies causées par des agents pathogènes thermophiles (qui sont favorisés par des températures élevées). Marçais et Desprez-Loustau (2007) ont notamment attiré l'attention sur une série d'agents pathogènes, tels que la

<sup>6</sup> [http://www.inra.fr/layout/set/print/presse/la\\_chenille\\_processionnaire\\_du\\_pin\\_remonte\\_verse\\_le\\_nord\\_a\\_la\\_vitesse\\_moyenne\\_de\\_55\\_6\\_km\\_par\\_decade](http://www.inra.fr/layout/set/print/presse/la_chenille_processionnaire_du_pin_remonte_verse_le_nord_a_la_vitesse_moyenne_de_55_6_km_par_decade)

<sup>7</sup> [http://www.cemagref.fr/Informations/Actualites/Actu/chgmt\\_climat/invasion-insectes1.htm](http://www.cemagref.fr/Informations/Actualites/Actu/chgmt_climat/invasion-insectes1.htm)

maladie des bandes rouges des aiguilles (*Dothistroma septospora*), le chancre du châtaignier (*Cryphonectria parasitica*), l'encre du châtaignier et du chêne (*Phytophthora cinnamomi*) ou encore l'oïdium du chêne (*Erisiphe alphitoïdes*), qui s'est développé au cours des 15 dernières années dans le sud-ouest de la France à la faveur d'hivers doux.

#### 1.1.2.4. La productivité générale

A l'époque où les pluies acides étaient étudiées (1986), un chercheur français, Michel Becker, se pencha sur les cernes de croissance pour tenter d'identifier les origines historiques de ce déclin forestier. Il fut surpris de constater que la largeur des cernes tendaient à augmenter depuis la fin du dix-neuvième siècle, indiquant un accroissement de la productivité (Peyron, 2007). La même constatation fut faite en Allemagne puis confirmée pour un grand nombre d'espèces dans différentes parties de l'Europe. Cet accroissement est aujourd'hui partiellement attribué au changement climatique (à la faveur du réchauffement et de l'action fertilisatrice du dioxyde de carbone) mais est sans doute dû par-dessus tout aux dépôts azotés provenant de l'agriculture et des transports.

Une hausse de la productivité forestière a également été mesurée par Bontemps (2006) **dans les forêts océaniques et continentales**, en particulier dans les chênaies du nord, dont la productivité a doublé. Tout comme Becker, Bontemps attribue cette évolution en premier lieu aux dépôts azotés. En effet, les températures et les précipitations sont restées stables entre 1940 et 1980 tandis que la productivité augmentait, ce qui exclut le facteur réchauffement planétaire pour expliquer ce phénomène. Comme d'autre part la productivité a plus augmenté à l'est qu'à l'ouest du pays et plus dans le nord que dans le sud, que les émissions sont plus fortes dans le nord et que les vents soufflent essentiellement d'ouest en est, les dépôts azotés ont pu être un des principaux moteurs de ce phénomène jusqu'à aujourd'hui. Toutefois, à l'avenir, les rôles du réchauffement et de la concentration en dioxyde de carbone pourraient se renforcer (paragraphe 1.2.2.4).

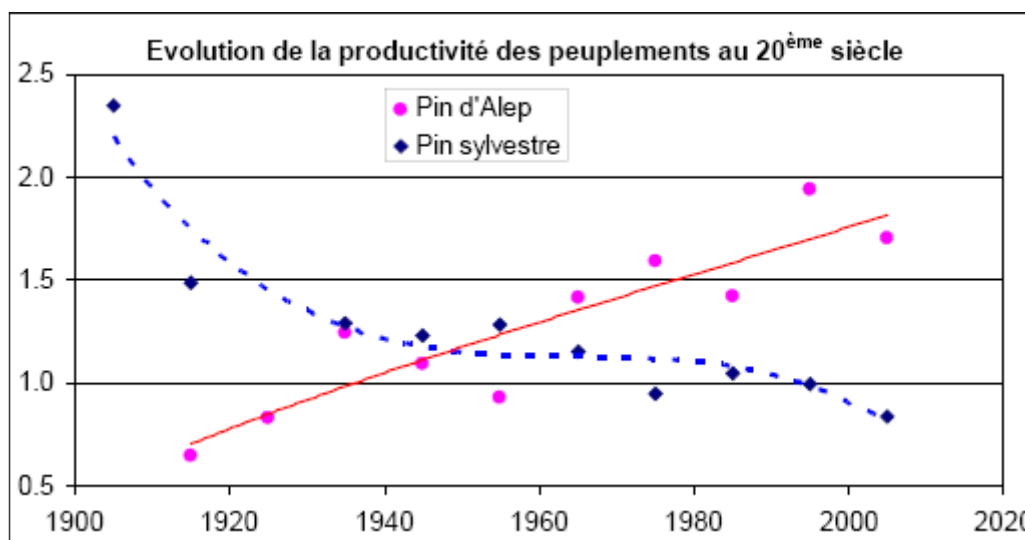


Figure 5 : Evolution de l'indice de productivité pour des peuplements moyens de pins d'Alep (400 m d'altitude environ) et de pins sylvestres (1100 m d'altitude environ) au cours du 20<sup>ème</sup> siècle (Vennetier, 2005).

**Dans les forêts méditerranéennes** de plaine et de montagne, dans le massif de la Sainte Baume, Vennetier (2005) a mis en évidence une augmentation de la croissance en diamètre et en hauteur des pins d'Alep (*Pinus halepensis*), une espèce typiquement méditerranéenne, tandis que le pin sylvestre (*Pinus sylvestris*), une espèce plus montagnarde, subissait au contraire un net ralentissement au cours du dernier siècle (Figure 5). Aujourd'hui, lorsque les

deux espèces se trouvent ensemble dans le même peuplement, le pin d'Alep présente une meilleure productivité que le pin sylvestre.

### 1.1.3. Les perturbations et les événements climatiques extrêmes

Un grand nombre de perturbations et d'événements climatiques extrêmes ont eu lieu en France : les sécheresses de 1976, 1989-90 et 2003, les feux de forêts, notamment au cours de certaines années sèches, et les tempêtes de 1982, 1987, 1990, 1999 et 2009. Il convient toutefois de rappeler qu'il n'y a pas d'augmentation statistiquement significative du nombre ou de l'intensité des tempêtes dans le pays (Moisselin et Dubuisson, 2006). Seules les événements les plus marquants seront abordés ici.

#### 1.1.3.1. Les tempêtes de 1999 et 2009

A la fin de l'année 1999, deux tempêtes frappèrent le pays, la première dans le nord (Lothar, le 26 décembre) et la seconde dans le sud (Martin, les 27 et 28 décembre). Elles mirent à terre environ 170 millions de mètres cubes – soit un volume équivalent à trois fois le volume annuel prélevé en France. Tout de suite après et tout au long du premier semestre de 2000, une expertise scientifique a tenté de répondre à deux questions clés qui s'imposaient (Biro *et al.*, 2000) : comment expliquer le niveau des impacts observés ? quels savoirs scientifiques et techniques pour reconstituer les forêts ? Cette expertise a été suivie d'un programme de recherche coordonné par ECOFOR et soutenu par les Ministères chargés de l'Agriculture et du Développement Durable, l'INRA et le CEMAGREF. Ces études portaient toutes sur la forêt, le vent et les divers risques associés (en matière d'économie, de pathologies, de diversité biologique, etc.).

Le 24 janvier 2009, une violente tempête baptisée Klaus s'abattit sur le sud-ouest de la France moins de 10 ans après Martin, en produisant plus de dégâts encore en Aquitaine (40 millions de mètres cubes à terre, principalement de pins maritimes *Pinus pinaster*). Plus de 230 000 ha de forêt ont vu au moins 40% des arbres qui les constituaient renversés ou cassés.

Même si la fréquence des tempêtes s'est accrue au cours des 30 dernières années par rapport aux décennies précédentes, il n'existe pas de tendance générale à l'échelle du siècle : l'activité des tempêtes a simplement retrouvé le niveau qui était le sien au début du 20<sup>ème</sup> siècle (Biro *et al.*, 2000). Du fait de la très grande variabilité inter-décennale et de la brièveté des séries statistiques, il est impossible de dire à l'heure actuelle si ces phénomènes sont en augmentation, ni s'ils sont liés au changement climatique. Cependant, le volume sur pied par hectare s'étant considérablement accru, les forêts sont devenues plus fragiles face à des événements de ce type.

#### 1.1.3.2. La sécheresse et la canicule de 2003

- **Les impacts sur les forêts continentales et océaniques : l'exemple du chêne**

Pendant et juste après la période de sécheresse, des cas de mortalités ont été relevés, causés par des contraintes physiologiques sur des terrains peu propices. C'était le cas par exemple des mortalités de chênes pubescents (*Quercus pubescens*) sur les versants sud des pré-Alpes. L'année suivante, en 2004, une deuxième vague de mortalités a été observée dans plusieurs régions (Lorraine, Centre, Midi-Pyrénées, etc.) du fait de pullulations d'insectes (notamment *Agrilus biguttatus* et *Scolytus intricatus*). Ces deux vagues de mortalités ont été suivies trois à quatre ans plus tard par une troisième, causée par un

mélange complexe de facteurs biotiques et non biotiques (Nageleisen, 2008). La sécheresse de 1976 avait ainsi entraîné le dépérissement de chênes jusque dans le milieu des années quatre-vingts.

Chez le chêne pédonculé (*Quercus robur*) en particulier, de nombreux cas de dépérissement sont en réalité le résultat d'une succession de contraintes climatiques diverses (saturations du sol aux printemps de 1999, 2000 et 2001 ; sécheresses des étés 2003, 2004 et 2005) et de pullulations d'insectes (défoliations par les chenilles en 2005). En outre, ces phénomènes se sont surtout produits dans des peuplements surcapitalisés (avec un volume accumulé excessif par hectare). Il est de ce fait difficile d'en dégager le facteur d'origine prépondérant.

- **Les impacts sur les forêts méditerranéennes<sup>8</sup>** (Vennetier, 2005)

Dans la région méditerranéenne, la période de croissance des ligneux commence dès la fin de l'hiver, ce qui fait que la sécheresse de l'été 2003 n'a pas eu d'influence grave sur la croissance de l'année. Les symptômes immédiats ont été une chute des aiguilles et des feuilles (de 30 à 80% chez le pin d'Alep *Pinus halepensis* et le pin sylvestre *Pinus sylvestris*), un dessèchement des racines chez l'ensemble des arbres et du bout des branches chez les espèces décidues. Une à trois années plus tard, la taille des aiguilles et des feuilles avait diminué (30 à 40% chez le pin sylvestre) et la croissance s'était infléchie. Des cas de dépérissement ont également été relevés, notamment chez le pin sylvestre à basse altitude. L'expérience des sécheresses du passé a montré que ces effets pouvaient persister 3 à 7 ans. Tous ces phénomènes ont été exacerbés par d'autres épisodes secs, moins intenses toutefois, survenus entre 2004 et 2006.

Le projet REFORME (coordonné par J. Guiot, CNRS) a par ailleurs mis en évidence un effet de la sécheresse sur la phénologie. Chez le pin d'Alep, la canicule de 2003 s'est traduite par une réduction de 30 à 60% de la taille des aiguilles, du nombre des aiguilles formées, de la longueur des pousses annuelles sur les branches et de la fructification. Le polycyclisme avait presque entièrement disparu après 3 années de sécheresse. Le modèle BILHY a en outre montré un défaut de production ligneuse d'environ 30%.

Le maquis et la garrigue ont également été concernés par un dépérissement massif. Même des espèces typiquement méditerranéennes telles que le romarin (*Rosmarinus officinalis*) et le chêne kermès (*Quercus coccifera*) sont mortes sur les terrains difficiles.

Pour conclure, le réchauffement climatique aura plusieurs répercussions sur les forêts méditerranéennes : baisse de la productivité, dépérissement, et aggravation du risque d'incendie du fait de l'énorme quantité de biomasse sèche présente (feuilles, aiguilles, branches, etc.) (Figure 6).

---

<sup>8</sup> [http://www.cemagref.fr/Informations/Actualites/Actu/chgmt\\_climat/index.htm](http://www.cemagref.fr/Informations/Actualites/Actu/chgmt_climat/index.htm)

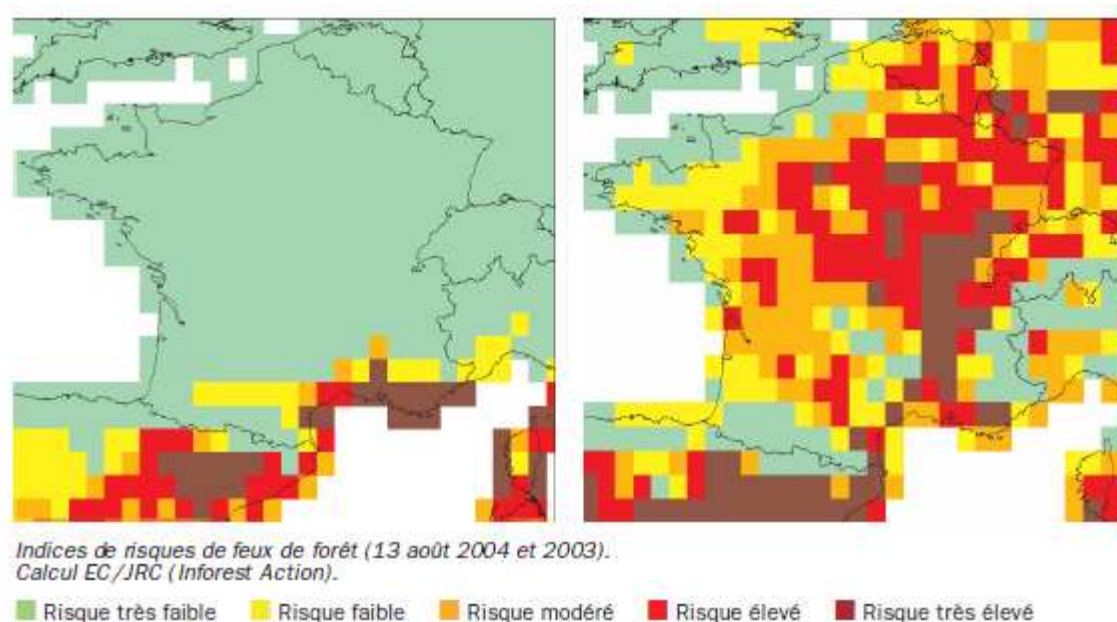


Figure 6 : Extension des zones concernées par les risque d'incendies forestiers entre un été "normal" (2004, à gauche) et un été particulièrement sec et chaud (2003, à droite).

### 1.1.3.3. Le coût des impacts

Le Ministère chargé du Développement Durable a fondé un groupe interministériel intitulé « Impacts du changement climatique, adaptation et coûts associés en France » avec l'ambition de mettre en évidence les impacts des changements climatiques sur certains secteurs importants tels que la santé, les ressources agricoles, forestières et hydriques, le bâtiment et les transports, l'énergie, le tourisme, les risques naturels et les assurances, l'utilisation des terres et la biodiversité. Le chantier est en cours, notamment en ce qui concerne le secteur forestier, avec un projet dirigé par le FCBA en liaison avec l'Université de Paris Ouest Nanterre La Défense. Les objectifs de cette étude sont d'estimer (i) les coûts et bénéfices directs des impacts du changement climatique sur les forêts et les industries, et (ii) les coûts et bénéfices des mesures d'adaptation.

Des analyses ont été conduites pour évaluer les pertes et les coûts imputables aux tempêtes (à la suite de celles de 1999) et aux sécheresses et canicules (à la suite de celles de 2003). Bien que cette démarche se soit limitée à ces deux aspects bien particuliers, elle pourrait se révéler utile, par les méthodes employées et par les résultats obtenus, pour évaluer les impacts du changement climatique. Les pertes associées en France aux tempêtes de 1999, d'une part, et à la sécheresse et à la canicule de 2003, d'autre part, pour les propriétaires forestiers, les compagnies d'assurance et le gouvernement français ont été estimées respectivement à 6 millions et 1 million d'Euros (Biro et Peyron, 2009).

## 1.2. Les impacts attendus

Les impacts passés et récents sont essentiellement connus par le biais d'observations, et le rôle des modèles s'est borné à les attribuer en partie au changement climatique. A l'inverse, les impacts attendus sont surtout décrits à l'aide de plusieurs types de modèles : les modèles (climatiques) de circulation générale (MCG), à l'échelle de la planète, des modèles climatiques régionaux, qui réduisent l'échelle des précédents afin de prendre en compte des facteurs locaux agissant sur le climat local, des modèles de végétation, qui recréent le

comportement de la végétation, y compris l'effet des forêts sur l'évolution du climat, et d'autres modèles en fonction des objectifs et des besoins, concernant par exemple la faune. Qui plus est, tous ces modèles s'appuient au départ sur des caractéristiques atmosphériques attendues (concentrations des gaz à effet de serre) et sur des paramètres climatiques (températures, précipitations, etc.) dont les valeurs sont données par les différents scénarios prospectifs socio-économiques du GIEC (Rapport spécial sur les scénarios d'émission, RSSE-GIEC).

### 1.2.1. L'évolution climatique attendue

L'évolution climatique attendue est explorée à l'aide de deux modèles français : le IPSL-CM4 de l'Institut Simon-Laplace et le CNRM-CM3 de Météo-France, dont la partie atmosphérique est constituée par le modèle Arpège-climat. Ces modèles diffèrent entre autres choses par leur niveau de précision (respectivement de 50 et 160 km). Ils ne servent que pour donner les grandes tendances climatiques.

A la fin du 21<sup>ème</sup> siècle, le climat méditerranéen – défini par un bilan hydrique inférieur à -350 mm par an – s'étendrait sur 60% ou 80% du territoire français respectivement selon les scénarios d'émissions de gaz à effet de serre B2 et A2. Les principales prévisions climatiques sont récapitulées dans les tableaux 1 et 2 ci-dessous.

**Tableau 1:** Prévisions climatiques pour la fin du 21<sup>ème</sup> siècle en France par rapport à la situation actuelle, selon deux scénarios différents d'émissions de gaz à effet de serre (Planton, 2004).

	<b>Scénario B2</b>	<b>Scénario A2</b>
<b>Températures annuelles moyennes</b>	De + 2 à 2,5°C	De + 3 à 3,5°C
<b>Précipitations hivernales</b>	Accroissement d'environ 25% des jours avec plus de 10 mm de précipitations	
<b>Précipitations estivales</b>	Diminution générale (surtout pour A2)	
<b>Périodes de canicule</b>	7 jours/an avec plus de 35°C de température maximale	14 jours/an avec plus de 35°C de température maximale
<b>Sécheresses estivales</b>	+ 4 jours secs par an	+ 9 jours secs par an

**Tableau 2 :** Evolution attendue des températures et des précipitations en France entre la période 1960-1989 et la période 2070-2099, en fonction de deux scénarios différents d'émissions de gaz à effet de serre (Planton, 2004).

	<b>Températures (+)</b>			<b>Précipitations</b>		
	<b>Annuelles</b>	<b>Hivernales</b>	<b>Estivales</b>	<b>Annuelles</b>	<b>Hivernales</b>	<b>Estivales</b>
<b>Scénario B2</b>	de +2 à 2,5°C	de +1,5 à 2°C	de +2,5 à 3,5°C	de -5 à 0%	de 0 à +10%	de -25 à -5%
<b>Scénario A2</b>	de +3 à 3,5°C	de +2,5 à 3°C	de +4 à 5°C	de -10 à 0%	de +5 à +20%	de -35 à -20%

Comme dans le cas des évolutions déjà observées, il existera des différences d'une région à l'autre (voir Annexe 1 pour les prévisions détaillées en fonction des scénarios A2 et B2) :

- Le nombre de journées sèches consécutives augmentera plus dans le sud-ouest tandis que la fréquence des tempêtes augmentera plus dans le nord ;
- Dans la région méditerranéenne (ainsi que dans le sud-ouest), l'augmentation des températures estivales et la baisse des précipitations printanières seront plus marquées qu'ailleurs, avec une fréquence plus élevée des périodes sèches et des pluies violentes ;

- La dégradation la plus sensible du bilan hydrique concernera tout d'abord les Alpes, puis principalement les régions méditerranéenne et sud-ouest au cours de la période 2050-2080.

Ces modèles sont relativement performants à l'échelle nationale, mais vu les importantes différences inter-régionales qui apparaissent, il serait intéressant de disposer de prévisions climatiques plus localisées afin d'anticiper les impacts locaux attendus et de préparer des stratégies d'adaptation. Les modèles actuels ne peuvent être utilisés à ces fins.

## **1.2.2. Les impacts sur la dynamique et le fonctionnement des écosystèmes**

### **1.2.2.1. La phénologie des plantes**

En considérant que la phénologie continuera à évoluer de manière linéaire en fonction du réchauffement planétaire, le projet CARBOFOR (coordonné par Lousteau, 2004) a estimé – à partir des tendances actuelles, en adoptant le scénario B2 – que la date de feuillaison avancera à raison de 5,4 à 10,8 jours par décennie au cours de la période 2000-2050. Ainsi, en 2050, les feuilles des arbres forestiers pourraient se déployer 27 à 54 jours en moyenne plus tôt qu'aujourd'hui. Certaines espèces, requerrant une exposition au froid, seraient à l'inverse retardées par un climat plus chaud. La double action de la température sur la phénologie (l'action des températures basses pour lever la dormance, puis l'action de températures plus élevées pour promouvoir la croissance cellulaire au cours de la quiescence) devrait toutefois se traduire par une réponse non linéaire de l'évolution phénologique à l'action du réchauffement.

### **1.2.2.2. Les aires de répartition des plantes**

Le projet CARBOFOR (coordonné par Lousteau, 2004) a modélisé les aires de répartition des principaux groupes d'espèces forestières en fonction du scénario B2 (IPCC-SRES, 2001). Ce résultat a été obtenu à l'aide de techniques de classification automatique et de modèles multivariés, en deux grandes étapes : la modélisation des aires de répartition de la végétation sous le climat actuel, puis la modélisation des aires de répartition potentielles en tenant compte du climat attendu pour la fin du 21<sup>ème</sup> siècle proposé par le modèle ARPEGE-Climat de Météo-France (basé sur le scénario B2). Compte-tenu des conditions climatiques attendues pour la fin du 21<sup>ème</sup> siècle, les modèles indiquent que le groupe des espèces méditerranéennes pourrait finir par occuper la totalité de la moitié sud du territoire national, tandis que le groupe des espèces tempérées-océaniques pourrait venir remplacer la végétation tempérée-continentale. L'aire de répartition potentielle des espèces alpines se limiterait aux seuls grands sommets des Alpes et des Pyrénées. Les espèces vulnérables sont pour la plupart celles qui se trouvent actuellement en limite sud de leur aire de répartition, telles que le pin sylvestre (*Pinus sylvestris*) et le hêtre (*Fagus sylvatica*). Le cas de ce dernier, qui est susceptible de disparaître des régions occidentales et centrales du pays, est emblématique. A l'inverse, le chêne vert (*Quercus ilex*) et le pin maritime (*Pinus pinaster*) pourraient voir leur aire s'étendre de manière spectaculaire.

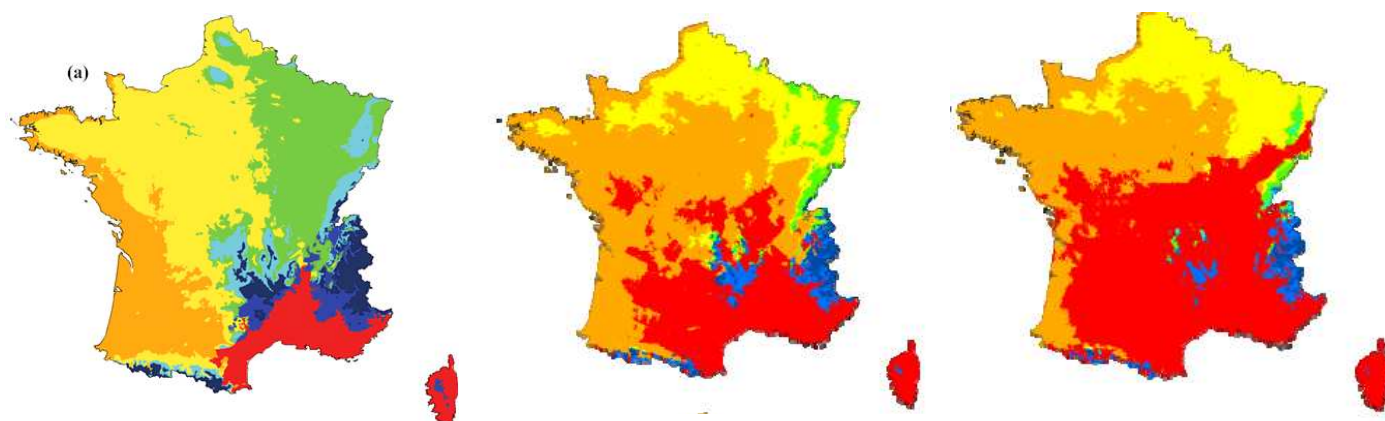
Cette approche s'appuie sur l'utilisation de modélisations statistiques des niches écologiques. Ces modèles tiennent compte des aires de répartition actuelles et des conditions actuelles pour déterminer la répartition future potentielle de la végétation en fonction des conditions attendues, mais en laissant de côté les processus biologiques tels que la génétique, la compétition et la phylogénèse. Une démarche alternative est la modélisation de processus, dont l'objectif est de prévoir les aires de répartition des espèces à partir de l'allocation des ressources, la démographie et la compétition. Ces modèles sont,



en théorie, plus robustes que les modèles de niche, mais exigent beaucoup plus de connaissances écologiques et de données (Thuiller, 2007).

**Tableau 3 :** Proportion du territoire français comprise dans l'aire de répartition de 7 groupes d'espèces, à l'heure actuelle et à la fin du 21<sup>ème</sup> siècle, en fonction des scénarios B2 et A2 d'émission de gaz à effet de serre (CARBOFOR, 2004).

Groupes	Principales espèces	Couleur	Actuel %	2100 % (B2)	2100 % (A2)
Plaine continentale	<i>Pinus sylvestris</i> , <i>Fagus silvatica</i>	Vert	22.4	3.2	1.2
Plaine du Centre	<i>Quercus robur</i> , <i>Castanea sativa</i> , <i>Carpinus betulus</i>	Jaune	35.6	17.4	16.4
Plaine océanique	<i>Pinus pinaster</i>	Orange	17.2	45.9	30.8
Méditerranéen	<i>Quercus ilex</i>	Rouge	9.1	28.1	47.9
Subalpin	<i>Pinus cembra</i>	Bleu foncé	5.2	2.3	1.0
Montagnard	<i>Larix decidua</i>	Bleu	4.1	3.0	2.4
Montagnard-collinéen	<i>Abies alba</i>	Cyan	6.3	0.1	0.3



**Figure 7 :** Evolution des aires de répartition de 7 groupes d'espèces : situation actuelle (à gauche), et modélisations pour la fin du 21<sup>ème</sup> siècle selon les scénarios B2 (au centre) et A2 (à droite). Pour la signification des couleurs, voir le Tableau 3. Source : CARBOFOR, INRA.

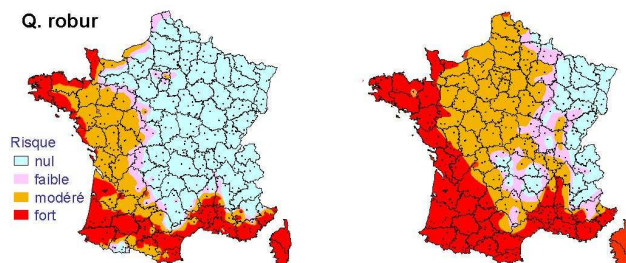
Un autre projet, baptisé « Effets des changements globaux sur la diversité végétale » (Qdiv, coordonné par P. Leadley<sup>9</sup>), est encore en cours. Son principal objectif est de produire des estimations quantitatives des modifications qui sont susceptibles d'intervenir dans la structure, la répartition dans l'espace et la diversité des communautés végétales en France à la suite de changements affectant le climat et la concentration en CO<sub>2</sub>. Ce travail s'appuiera sur une combinaison d'observations, d'expériences et de modélisations mathématiques.

### 1.2.2.3. Les insectes, les parasites et les agents pathogènes

**Les impacts du changement climatique sur les pathogènes forestiers** (CARBOFOR, 2004) se manifestent essentiellement par une extension de l'aire de répartition des espèces limitées par les basses températures ou le gel des sols. Dans le cas des oïdiums, le réchauffement prévu accroîtrait la fréquence des infestations annuelles de 10% à 50-70%. Pour les rouilles du peuplier (espèces polycycliques), une hausse de 1°C de la température moyenne de l'air se traduirait par un avancement de 11 jours des dates de première

<sup>9</sup> [www.qdiv.u-psud.fr](http://www.qdiv.u-psud.fr)

infestation et par un accroissement de 33% de la proportion de tissus infestés en fin de période de croissance. Il reste que l'évolution des précipitations (moins abondantes pendant la période de végétation) aura des conséquences différentes sur les espèces selon leur biologie, ainsi que l'illustrent les deux exemples ci-dessous (l'encre du chêne et le chancre du châtaignier).



**Figure 8 :** Exemple du risque de présence de l'encre du chêne (*Phytophthora cinnamomi*). A gauche : situation en 1968-2008 ; à droite, situation prévue en 2068-2098 selon le scénario B2. Source : INRA.

Le chancre du châtaignier (*Cryphonectria parasitica*), contrairement à l'encre du chêne, serait en régression, même si le châtaignier y serait plus sensible du fait du stress hydrique. Mais les températures au cours de la période de croissance de ce pathogène seraient trop élevées et peu favorables à son développement (Desprez-Lousteau *et al.*, 2007).

Le réchauffement attendu pour les prochaines décennies sera plus marqué que celui qui est derrière nous. Ainsi, pour Candéau (2008), **les modifications attendues touchant les aires de répartition et la phénologie des insectes** pourraient se révéler plus profondes à l'avenir. Toutefois, dans l'état actuel des connaissances, nous ne sommes pas à même de prévoir l'évolution des populations d'insectes et leurs impacts sur les écosystèmes forestiers. D'une part, les effets directs du réchauffement, déjà observés (meilleure survie en hiver, extension vers des latitudes et des altitudes plus élevées, modification de la phénologie), pourraient se renforcer, tandis que d'autre part, les effets indirects, tels que l'éventuelle désynchronisation phénologique entre plantes hôtes et parasites, seront plus difficiles à détecter et à analyser.

#### 1.2.2.4. La productivité générale

Deux grandes tendances ont pu être dégagées en ce qui concerne la croissance et la productivité des peuplements (Roman-Amat, 2007 ; projet CARBOFOR, 2004) :

- Une augmentation là où les températures actuelles constituent le principal facteur limitant (notamment dans le nord-est et dans les zones de montagne) – augmentation due à l'allongement de la période de végétation et à une meilleure performance photosynthétique amenée par la hausse de la concentration en CO<sub>2</sub>, à condition que l'eau et l'azote ne deviennent pas limitants ;
- Une diminution à cause des contraintes hydriques, notamment sur les sols à faibles réserves en eau, tout d'abord dans le sud-ouest, puis s'étendant vers le nord et l'est ; d'après les scénarios les plus pessimistes modélisés, la production de bois et les récoltes pourraient subir une forte baisse dans une grande partie sud de la France.

A l'échelle nationale, ces deux tendances vont se combiner pour donner globalement une augmentation de la croissance annuelle jusqu'en 2050, puis une diminution. La fréquence plus élevée des événements extrêmes (sécheresses, feux de forêt, etc.) devrait avoir une incidence négative sur la productivité future.

**Dans le cas particulier des forêts méditerranéennes**, des modélisations de la croissance de la végétation ont été réalisées dans le cadre du projet REFORME (Réponses de la Forêt

Méditerranéenne aux changements climatiques ; Guiot (coordinateur) *et al.*, 2007) en partant du scénario B2. La comparaison entre le chêne vert (*Quercus ilex*) et le pin d'Alep (*Pinus halepensis*) a montré que ces deux espèces présentent un pic de croissance pendant la première décennie du 21<sup>ème</sup> siècle, avec une productivité multipliée par trois chez le pin d'Alep. Par la suite, les sécheresses s'intensifient, ces espèces voient leur productivité décroître jusqu'à la fin du 21<sup>ème</sup> siècle – de 28% pour le chêne vert et de 8% pour le pin d'Alep, qui semble mieux résister au stress hydrique. Grâce à l'effet fertilisant du CO<sub>2</sub> qui accroît l'efficacité de l'utilisation de l'eau, les deux espèces résistent relativement bien au stress hydrique (avec une productivité légèrement supérieure). Une étude statistique menée en parallèle a mis en évidence l'importance des effets différés des événements extrêmes survenus les années précédentes. En dégradant l'état sanitaire de l'arbre et par les défoliations qui s'ensuivent, ces effets se cumulent sur plusieurs événements successifs. Ces effets différés ont le potentiel de limiter l'action fertilisante du CO<sub>2</sub>. Le pin d'Alep, enfin, sans doute du fait de sa capacité à fermer ses stomates de manière précoce, semble mieux résister que le chêne vert.

De son côté, Vennetier (2005) a simulé l'évolution du pin sylvestre (*Pinus sylvestris*) et du pin d'Alep (*Pinus halepensis*) dans le massif de la Sainte Baume, dans le sud-est de la France. Le premier, plus montagnard, s'avère plus sensible au réchauffement planétaire (Figure 9).

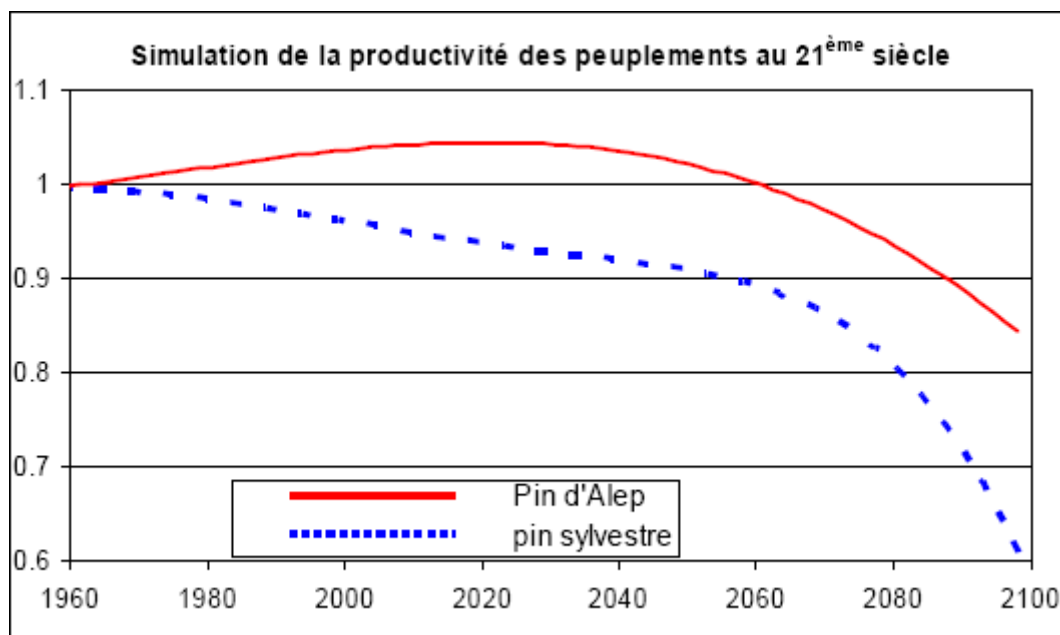


Figure 9 : Simulation de l'évolution de la productivité chez le pin d'Alep et chez le pin sylvestre, une espèce plus montagnarde, au cours du 21<sup>ème</sup> siècle dans le massif de la Sainte Baume, sans tenir compte des événements extrêmes (Vennetier, 2005).

### 1.2.3. Les perturbations et les événements climatiques extrêmes

Deux projets en cours visent à étudier l'influence des événements climatiques extrêmes, notamment les sécheresses, sur les écosystèmes forestiers et les principales espèces forestières :

- Le projet DRYADE (coordonné par N. Bréda) : Vulnérabilité des forêts face aux changements climatiques, de l'arbre à l'aire bioclimatique<sup>10</sup> ;

<sup>10</sup> [www.inra.fr/dryade](http://www.inra.fr/dryade)

- Le projet DROUGHT (coordonné par J. Guiot) : *Mediterranean ecosystems face increasing droughts - Vulnerability Assessment* (les écosystèmes méditerranéens confrontés à une intensification des sécheresses – évaluation de la vulnérabilité).

Vennetier (2005) souligne par ailleurs le rôle des épisodes secs dans l'aggravation du risque de feu de forêt du fait de l'augmentation de la biomasse sèche (feuilles, aiguilles, branches, etc.) à la suite d'une canicule (paragraphe 1.1.3.2). Dans les forêts méditerranéennes et les forêts tempérées méridionales, le changement climatique se traduira par un allongement de la période de risque d'incendie (CARBOFOR, 2004). L'abandon des terres agricoles et l'extension des zones urbaines et des forêts péri-urbaines – où la fréquence des mises à feu est la plus élevée – contribuent ensemble à accroître le risque d'incendie dans les écosystèmes forestiers méridionaux (pour la plupart laissés à eux-mêmes), comme on l'observe déjà depuis les années 1970. Sous un climat en évolution, le nombre moyen d'années séparant deux incendies consécutifs au même endroit est susceptible de passer de 72 ans à 62 ans pour les forêts méditerranéennes et de 20 à 16 ans pour le maquis. Une fréquence plus élevée des feux s'opposerait à son tour à l'extension forestière dans le sud de l'Europe et entraînerait la domination d'espèces arbustives à croissance rapide ou d'espèces capables de rejeter de souche.

#### **1.2.4. Le coût des impacts futurs**

Ainsi qu'il a déjà été souligné (paragraphe 1.1.3.3), le Ministère chargé du Développement Durable a mis sur pied un groupe de travail interministériel chargé d'analyser « les impacts du changement climatique, l'adaptation et les coûts associés en France ». Les travaux sont encore en cours, en particulier ceux touchant au secteur forestier, avec un projet dirigé par le FCBA en liaison avec l'Université de Paris Ouest Nanterre La Défense. Les objectifs de ce chantier sont d'estimer (i) les coûts et les bénéfices directs des impacts du changement climatique sur les forêts et les industries et (ii) les coûts et bénéfices des mesures d'adaptation aux horizons 2030, 2050 et 2100.

### **1.3. Le suivi des impacts**

#### **1.3.1. Les dispositifs et réseaux de suivi de fond**

Comme dans nombre d'autres pays, le premier réseau de surveillance de France a été l'Inventaire Forestier National (IFN). Il fut créé en 1958 et mis en place sur l'ensemble du territoire français dans les années soixante et soixante-dix. Plus tard, il s'avéra très utile pour comptabiliser la séquestration du carbone en liaison avec l'enquête nationale annuelle sur l'utilisation des terres TERUTI. A la fin des années soixante-dix et au début des années quatre-vingts, une détérioration sanitaire des forêts a été constatée sur beaucoup de sites (Introduction et paragraphe 1.1.2.4), ce qui a conduit à l'organisation d'un système de surveillance de la santé forestière aux échelles nationale et européenne (réglementation de 1986).

**Le réseau permanent d'observation des forêts** actuellement en place peut être représenté par le schéma suivant :



Sept des neuf sites du réseau F-ORE-T (Observatoire de Recherche en Environnement sur le Fonctionnement des Ecosystèmes Forestiers) sont situés en France métropolitaine (les deux derniers sites se trouvent en Guyane française et en Côte d'Ivoire). Ils représentent les différents types forestiers français : forêt de plaine, méditerranéenne, artificielle et tropicale. Le fonctionnement et la quantification des flux de carbone y sont établis, ainsi que les bilans des nutriments et des minéraux<sup>11</sup>. Ces données sont celles exploitées par le projet CARBOFOR (2004).

Au niveau 2, les paramètres météorologiques, dendrométriques et dendrochronologiques sont estimés. En outre, les apports atmosphériques sont évalués sur 27 parcelles et les solutions du sol sur 17. De nouveaux objectifs sont fixés pour ce réseau, notamment pour étudier l'évolution des écosystèmes forestiers en réponse au changement climatique.

Au niveau 1, des parcelles permanentes ont été délimitées depuis 1989 dans une perspective européenne. Vingt arbres par parcelle sont examinés chaque année pour dresser un bilan sanitaire des forêts.

Au niveau 0, l'Inventaire Forestier National (IFN) conduit une étude permanente sur plus de 7000 parcelles temporaires par an (une parcelle pour 2000 ha de forêt). Des données dendrométriques, écologiques (plantes et sol) et environnementales sont recueillies par télédétection et mesures sur le terrain. Ces réseaux sont complétés par les observations non systématiques du Département de la Santé des Forêts (DSF).

**En ce qui concerne la biodiversité**, le Muséum National d'Histoire Naturelle (MNHN) coordonne un réseau national comprenant des sous-réseaux régionaux. L'objectif est de suivre l'état de la nature en observant certains groupes indicateurs de biodiversité : oiseaux, papillons, chauves-souris et bientôt plantes et amphibiens. La plupart des observations sont effectuées par des réseaux de naturalistes volontaires selon des protocoles scientifiques accessibles à tous<sup>12</sup>.

### **1.3.2. Les dispositifs de veille spécifiques**

Le Système d'Information Phénologique pour l'Etude et la Gestion des Changements Climatiques (SIP-GECC) coordonné par I. Chuine (CNRS) a été créé afin de :

- Disposer d'une base de données nationale sur les observations phénologiques réalisées en France depuis 1880 ;

<sup>11</sup> [www.gip-ecofor.org/f-ore-t](http://www.gip-ecofor.org/f-ore-t)

<sup>12</sup> [www2.mnhn.fr/vigie-nature](http://www2.mnhn.fr/vigie-nature)

- Poursuivre les observations phénologiques sur un ensemble d'espèces sélectionnées sur la base de leur importance socio-économique et des données historiques existantes ;
- Exploiter ces données phénologiques pour la recherche fondamentale et appliquée, en particulier dans le domaine de l'évolution du climat.

Ce réseau national est détaillé à l'échelle régionale, avec par exemple une étude dans les régions Nord-Pas-de-Calais et Picardie (nord de la France). Il est en outre complété par un suivi des stades phénologiques de certaines espèces<sup>13</sup> ouvert aux amateurs.

Plus particulièrement, les capacités de couverture et de surveillance des satellites d'observation de la Terre pourraient être exploitées pour évaluer l'effet des sécheresses sur les écosystèmes forestiers (Deshayes *et al.*, 2006). En effet, les capteurs aériens et spatiaux représentent une source d'informations exceptionnelle pour suivre la réponse des forêts à la sécheresse de 2003 à une échelle qui va du local au régional : la plupart des anomalies du couvert forestier peuvent être détectées de l'espace. Cette propriété s'est avérée extrêmement utile pour suivre l'activité forestière saisonnière et inter-annuelle. En effet, les anomalies de l'activité végétale, perçues à travers les indices de végétation ou de stress hydrique, ont pu être détectées en temps quasi réel. Ce suivi peut être prolongé sur plusieurs années afin d'analyser la réponse à long terme de la forêt à la sécheresse.

Roman-Amat (2007) a suggéré la création d'un groupe de travail commun au Département de la Santé des Forêts et à l'Inventaire Forestier National pour renforcer l'enquête sur la santé forestière en appliquant des protocoles d'étude dans le cadre desquels ces deux organismes déploieraient leurs expertises complémentaires.

## **1.4. La gestion des impacts**

Les impacts de la plupart des événements extrêmes de ces dernières années (tempêtes de 1999, sécheresses et incendies de 2003) ont été gérés par l'Etat français (Ministère de l'Agriculture) et par tous les organismes associés à la gestion forestière (voir l'exemple détaillé ci-dessous). Comme ces événements étaient sans précédents par leur ampleur, des expertises scientifiques nationales et internationales ont rapidement été lancées : Birot *et al.* (2000) après les tempêtes, puis ECOFOR en 2003 pour la coordination de l'étude sur l'impact de la sécheresse et de la canicule. Ces expertises ont donné lieu à des publications dans des revues professionnels et scientifiques. Deux à trois ans plus tard, des guides ont également été publiés afin de récapituler les principales leçons de la gestion de ces crises et les mesures à suivre pour en éviter d'autres ou, tout au moins, en atténuer les effets potentiels (guide ONF sur la reconstitution des forêts après la tempête, guide en cours de rédaction sur la gestion du dépérissement, etc.).

Ainsi, à la suite des tempêtes de 1999, le gouvernement français a publié le 12 janvier 2000 un plan d'urgence pour les forêts françaises, complété ultérieurement par toute une gamme de mesures *ad hoc* pour répondre à des problèmes particuliers. Afin d'encourager les opérateurs à débarrasser les arbres abattus, une première série de mesures a été élaborée pour dégager et améliorer les accès carrossables, proposer un pré-financement pour l'enlèvement du bois, former les bûcherons et subventionner l'acquisition d'engins. Un second train de mesures, conçu pour maximiser la valeur des énormes quantités de bois à extraire très rapidement, a été lancé pour encourager les industries et les opérateurs forestiers à stocker le bois, à remettre à plus tard les coupes de peuplements intacts et à transporter le bois à l'extérieur des zones dévastées, et pour promouvoir les utilisations du

<sup>13</sup> [www.obs-saisons.fr](http://www.obs-saisons.fr)

bois. Le troisième train de mesures a été concentré sur la protection et la restauration des forêts affectées par des problèmes phytosanitaires, la prévention du risque accru d'incendie, l'incitation à la restructuration des parcelles en prévision des reboisements, le nettoyage des parcelles endommagées et les opérations mêmes de reboisement. Des conditions spéciales ont été accordées en matière de taxe foncière, impôt sur le revenu, impôt sur la fortune et TVA. Enfin, le gouvernement a mis sur pied diverses mesures d'accompagnement, telles que l'estimation des dégâts par photographies aériennes, l'envoi de personnel supplémentaire pour assister les organismes oeuvrant sur le terrain, l'octroi d'une aide spéciale pour les forêts domaniales et la constitution d'un groupe de réflexion pour examiner les questions relatives à l'assurance des forêts.

Dans le sillage de ces tempêtes, l'Office National des Forêts (ONF) a élaboré une méthodologie pour gérer ce type de crise et a mis sur pied un système de gestion des crises en trois volets (Mortier et Bartet, 2004) : (i) une organisation de veille hors période de crise ; (ii) un déploiement du dispositif en cas de crise ; (iii) un retour d'expérience après la crise.

## 2. L'adaptation

### 2.1. *La vulnérabilité des forêts au changement climatique*

L'adaptation au changement climatique vise à diminuer la vulnérabilité des systèmes naturels et humains et à mettre à profit les opportunités qui pourraient se présenter. En France, ces deux angles de vue existent mais l'accent est mis sur les impacts négatifs plus que sur les impacts positifs. Cette attitude peut s'expliquer de différentes manières.

Le principal impact positif du changement climatique en France est une augmentation de la productivité. Il reste que l'accroissement observé de la productivité forestière n'est pas uniquement dû au changement climatique, mais, également et sans doute surtout, à d'autres facteurs tels que les dépôts d'azote (paragraphe 1.1.2.4). Cette hausse doit normalement se poursuivre jusqu'en 2050, la part due au changement climatique devenant progressivement plus importante aux dépens de celle due aux dépôts d'azote. Après 2050, cependant, les contraintes écologiques et les événements climatiques extrêmes sont susceptibles d'inverser cette tendance : une certaine conscience du caractère temporaire de cet effet positif existe donc.

Comment cette hausse de la productivité peut-elle être exploitée par le secteur forestier ? Pour le moment, elle a augmenté l'écart entre l'accroissement net du matériel sur pied et les volumes prélevés, mais n'a pas été mise à profit. L'adaptation permettrait-elle de changer cette situation ? Sans doute serait-il possible d'accélérer le rythme d'exploitation des ressources forestières françaises (le Président français a annoncé le 19 mai 2009 à Urmatt des mesures pour développer l'utilisation du bois), mais une telle ligne d'action est habituellement considérée comme relevant du contexte économique, à savoir, du rythme de croissance et du prix de l'énergie, plus que du changement climatique.

Il existe cependant un facteur à la fois lié au changement climatique et susceptible d'apporter une solution : la contribution de la foresterie au cycle du carbone. Des récoltes de bois ronds plus importantes permettraient de tirer profit de la productivité croissante tout en contribuant à l'atténuation à long terme du changement climatique. Toutefois, les propriétaires forestiers ne voient pas encore clairement comment intégrer cette approche dans les flux économiques et dans les processus de décisions. Qui plus est, cette contribution dépend de la possibilité d'adapter la foresterie aux effets délétères du changement climatique qui sont présents dans tous les esprits.

Il ressort donc que la réduction des futurs impacts du changement climatique constitue un défi majeur pour les propriétaires, les gestionnaires et les décideurs du secteur forestier français. Il sera nécessaire, pour y parvenir, de mieux évaluer la vulnérabilité réelle des forêts au changement climatique et de mettre au point des méthodes d'adaptation qui n'existent pas encore.

Les forêts ont été considérées vulnérables depuis les trois derniers événements climatiques extrêmes (les tempêtes de 1999, la sécheresse et la canicule de 2003 et les tempêtes de 2009). La vulnérabilité réelle des forêts françaises au changement climatique est supposée plutôt forte dans la mesure où le pays sera le théâtre de changements significatifs (paragraphe 1.2.1) – avec plus de périodes sèches - et où des intérêts économiques liés à la productivité relativement élevée de la plupart de ces forêts sont en jeu.

Cette vulnérabilité reste toutefois peu connue, car seules quelques études ont été menées à ce jour sur le sujet : le projet CARBOFOR montre comment les aires de répartition des essences pourraient se déplacer avec le temps, mais en s'appuyant sur des méthodes



statiques, sans prendre en compte les processus écologiques. En outre, il existe plusieurs scénarios socio-économiques et climatiques en ce qui concerne l'avenir, et un scénario pessimiste – par exemple dérivé du scénario A2 – devrait susciter des mesures d'adaptation très différentes de celles qui seraient induites par un scénario plus optimiste de type B2 par exemple. Qui plus est, les chênes (*Quercus petraea* et *Quercus robur*), qui couvrent environ un tiers de la surface des forêts françaises, sont des espèces longévives (en particulier *Q. petraea*) pour lesquelles les révolutions dépassent 100 ans, pour parfois atteindre 240 ans. L'importance de ces délais souligne combien les forêts françaises pourraient s'avérer vulnérables.

Ce sentiment de vulnérabilité a suscité de multiples actions dans le domaine de la foresterie et du changement climatique, dont une contribution à la Stratégie Nationale d'Adaptation au Changement Climatique, un chapitre spécial du Programme Forestier National, deux rapports ministériels consacrés au changement climatique, et une contribution au processus participatif du « Grenelle de l'Environnement » consacré à l'environnement planétaire.

## **2.2. La stratégie et les politiques générales en matière d'adaptation**

Une stratégie générale pour l'adaptation au changement climatique a été publiée en 2007 par l'**Observatoire National sur les Effets du Réchauffement climatique** (ONERC), un organisme créé en 2001 et rattaché au Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement Durable et de la Mer (MEEDDM). La mission de l'ONERC est de recueillir puis de diffuser auprès du grand public et des administrations locales des informations (études et recherches) sur le changement et sur les risques d'événements extrêmes liés au climat. Il peut recommander des mesures de prévention et d'adaptation pour limiter les risques relatifs au changement climatique.

Toutes ces recommandations figurent dans la stratégie proposée, et concernent à la fois des secteurs industriels et agricoles (agriculture, énergie et industrie, transport, bâtiment, tourisme, banques et assurances) et différents types de territoires (villes, littoral et mer, montagnes, forêts). Pour ce qui est des forêts, les recommandations correspondent à des spécifications très générales : choix et mélange d'espèces locales, entretien et création de lisières, coupes d'éclaircie sévères et précoces afin de limiter la concurrence pour l'eau et d'améliorer la stabilité des peuplements, etc. Cette stratégie souligne que des recherches et des études sur l'adaptation des forêts sont nécessaires pour pouvoir répondre aux nombreuses questions qui subsistent sur ce sujet.

Cette stratégie pour l'adaptation au changement climatique est actuellement complétée par la Stratégie Nationale pour le Développement Durable (SNDD) de la Commission Générale du Développement Durable (CGDD) du MEEDDM. Cette seconde stratégie découle de la réflexion du « Grenelle de l'Environnement » (voir plus loin) ; sa version finale devrait bientôt être élaborée. La première version définit neuf défis, dont le premier concerne le changement climatique et les énergies non polluantes. Pour le relever, un des objectifs est de préparer l'adaptation des territoires locaux au changement climatique et leur participation à son atténuation. Deux recommandations concernent les espaces boisés : le développement des bioénergies provenant des forêts, et la prise en compte du changement climatique et de ses conséquences dans la gestion forestière afin de préserver et la biodiversité et les capacités de production.

Certaines politiques régionales sont également mises au point dans plusieurs régions françaises dans le cadre de plans d'action appelés « Plans Climat ». Certains d'entre eux, tel

que celui de la région Aquitaine, comportent un volet particulier consacré aux forêts accompagné de mesures d'adaptation.

## **2.3. Les mesures d'adaptation forestières**

### **2.3.1. Le niveau politique**

Conformément aux engagements internationaux et européens (Rio de Janeiro en 1992, Lisbonne en 1998 et Vienne en 2003), le gouvernement français a établi un **Programme Forestier National** (PFN). Les acteurs de la forêt et de la filière bois ainsi que les ONG environnementales y sont représentés et y ont fixé les principales lignes directrices des politiques françaises en matière de forêts. L'objectif principal du PFN est de continuer à améliorer la gestion durable des forêts.

Le programme fixé pour la période 2006-2015 prend en compte le changement climatique en le considérant comme une question de toute première importance. Il recommande d'améliorer la recherche et le développement en matière d'impacts et d'adaptations (sylviculture, plantations, etc.) et propose, d'une part, de renforcer la contribution de la filière bois à l'atténuation du changement climatique et, d'autre part, de développer le bois-énergie et le bois comme matériau respectueux de l'environnement.

**En matière de biodiversité**, la Stratégie Nationale pour la Biodiversité (SNB) – établie conformément à la Convention sur la Diversité Biologique (CBD, signée à Rio de Janeiro en 1992) – se décline en plusieurs plans de gestion, dont un concerne les forêts. Ce dernier a été mis au point en accord avec la stratégie du PFN relative à la biodiversité. Cette stratégie commune vise à promouvoir une gestion durable des forêts associant la production de bois et l'accroissement de la biodiversité. Plus précisément, l'objectif est de préserver la biodiversité ordinaire et spécifique tout en tenant compte de l'évolution des écosystèmes forestiers sous l'effet du changement climatique. Une des principales propositions est d'analyser les relations entre changement climatique et biodiversité afin d'améliorer les mesures de protection et d'évaluer leurs effets sur la biodiversité. D'autres propositions concernent la formation des propriétaires forestiers et des gestionnaires, le développement de la certification forestière, etc.

En juillet 2007, le gouvernement français a lancé le processus du « **Grenelle de l'Environnement** »<sup>14</sup>. Des groupes de travail comprenant des représentants de l'Etat, des collectivités locales, des ONG et des associations du patronat et de salariés ont été constitués : changement climatique et énergie, biodiversité et ressources naturelles, environnement et santé, production et consommation, compétitivité et emploi. Des propositions générales ont été élaborées. De novembre 2007 à janvier 2008, les « **Assises de la Forêt** » ont établi plus précisément des propositions concernant la forêt et la filière bois. Vingt mesures ont été proposées pour exploiter plus de bois et mieux (la récolte annuelle, qui correspond aujourd'hui aux deux-tiers seulement de l'accroissement biologique, estimé à environ 100 Mm<sup>3</sup>/an, devrait s'accroître de 12 Mm<sup>3</sup> en 2012 et de 20 Mm<sup>3</sup> en 2020).

Ces travaux se sont partiellement appuyés sur deux rapports : le premier commandé par le Ministère de l'Agriculture à Bourgau, Lerat et Cailmail (2007), et le second commandé par les deux Ministères chargés de l'Agriculture et de l'Environnement à Roman-Amat (achevé en décembre 2007). Trente-deux propositions figurent dans ce dernier rapport (Roman-

---

<sup>14</sup> [www.legrenelle-environnement.gouv.fr](http://www.legrenelle-environnement.gouv.fr)

Amat, 2007), articulées autour de 5 thèmes : recherche et développement, risques, production, biodiversité et gouvernance. Deux niveaux de priorité sont définis selon que les propositions sont à mettre en œuvre avant ou après 2010.

La seconde proposition est de **confier à GIP-ECOFOR la responsabilité nationale pour la coordination de toutes les recherches concernant l'adaptation des forêts au changement climatique**. Cette proposition a pris effet en septembre 2008.

La quatrième proposition est de créer en 2008 deux Réseaux Mixtes Technologiques (RMT) incluant à la fois des organismes de recherche et développement et des centres de formation. Le premier s'intéresserait aux stations forestières et le second à la variabilité génétique des essences forestières. Un troisième devrait être en préparation sur la modélisation et les sylvicultures. En réalité, un seul **RMT global, baptisé AFORCE** (Adaptation des forêts au changement climatique), dirigé par l'Institut pour le Développement Forestier (IDF), a été créé en août 2008 après accord du Ministère de l'Agriculture. Onze partenaires sont associés avec le GIP-ECOFOR. Cinq thèmes sont couverts : (i) les stations forestières, (ii) les facteurs de vulnérabilité des peuplements forestiers, (iii) le développement et la préservation des ressources génétiques, (iv) la croissance et la sylviculture, (v) les conséquences économiques pour la production forestière. Les objectifs principaux en sont : (i) la publication de guides et d'autres documents, (ii) la structuration et le transfert d'informations aux professionnels, (iii) l'organisation de réseaux scientifiques et techniques sur l'évolution de la sylviculture, les stations forestières, les stratégies en matière d'espèces et le choix des provenances.

En ce qui concerne les ressources génétiques, la **Commission des Ressources Génétiques Forestières** (CRGF), composée de chercheurs, de gestionnaires forestiers publics et privés et de représentants des ONG environnementales, a mis au point une stratégie générale pour préserver et exploiter la diversité des ressources génétiques forestières afin d'améliorer les capacités d'adaptation des forêts au changement climatique. Ses principales préconisations sont les suivantes (CRGF, 2008) :

- Promouvoir une sylviculture qui préserve la diversité génétique à long terme ;
- Favoriser les processus évolutifs afin de permettre aux peuplements de s'adapter naturellement à leur environnement ;
- Apporter des réponses graduées en fonction du degré de dépérissement à l'échelle de la région ou du massif.

## **2.3.2. Le niveau de la gestion**

### **2.3.2.1. Les forêts publiques**

Dans le cas des **forêts publiques** (environ 4 millions ha en France métropolitaine), l'**Office National des Forêts (ONF)** a réagi rapidement dès 1994 en participant activement aux études menées à l'échelle nationale et locale, et vient de publier une stratégie globale (Office National des Forêts, 2009). Des directives ont été élaborées (Legay et Mortier, 2006) pour tenter d'anticiper les changements sans précipitation et de tirer parti de la plasticité et de la résilience des écosystèmes. Elles comprennent des directives nationales et locales en matière de planification de la gestion, de sylviculture, de biodiversité et de protection des sols :

1. **Mise au point de dispositifs de surveillance et de techniques de télédétection** pour repérer les risques naissants et réagir promptement aux situations de crise ;
2. **Participation active aux programmes de recherche** sur l'évaluation des impacts, l'adaptation et l'atténuation ;
3. **Stratégie de planification de la gestion** : la diffusion des directives et des orientations nationales et régionales ; la recommandation de combinaisons espèces-

stations ; l'utilisation d'espèces/provenances/matériel adapté(es) ; la préservation et l'enrichissement de la diversité génétique des espèces indigènes et acclimatées ; le recours réfléchi aux espèces exotiques en tenant compte de leur adaptation constatée et de leurs performances dans les essais sur le terrain ;

4. **Planification de la gestion** : le recensement des peuplements menacés et leur remplacement progressif en commençant par les situations les plus fragiles (chêne pédonculé *Quercus robur*, épicéa *Picea abies*) ; le choix des espèces en distinguant bien la dynamique des jeunes stades de l'adaptation à long terme à la station ; la lutte contre l'extension d'espèces mal adaptées par le biais d'opérations sylvicoles inappropriées (par exemple l'extension du sapin pectiné *Abies alba* dans des sites de basse altitude du fait des régimes inéquiennes) ; l'adaptation des diamètres cibles aux demandes du marché et aux risques (état sanitaire, baisse de la qualité) ;
5. **Sylviculture** : la prise en compte de l'accélération de la croissance dans les préconisations sylvicoles, par exemple l'obtention plus rapide des diamètres cibles ; dans les peuplements équiennes, l'application rigoureuse des directives afin de renforcer la résilience dans les peuplements mélangés, jeunes et vigoureusement éclaircis ; la diminution du matériel sur pied dans les peuplements âgés et surcapitalisés ; l'utilisation de la régénération naturelle aussi souvent que possible (espèces adaptées à la station et au futur climat, porte-graines en suffisance) ; dans les peuplements inéquiennes, l'application des recommandations en matière de matériel sur pied (surface basale) et l'adoption du même diamètre cible que pour les peuplements équiennes ; la restauration de l'équilibre entre forêt et faune sauvage afin d'éviter que l'abrutissement par les herbivores ne fasse disparaître des espèces adaptées ;
6. **Biodiversité** : la création d'un réseau d'arbres morts, de vieux peuplements (ayant dépassé la révolution habituelle) et de peuplements sénescents ;
7. **Protection des sols** : la prévention du tassement des sols par les engins (en utilisant des pistes de débardage désignées, en développant le débardage par câble, etc.), la préservation de la fertilité (en évitant d'exporter tous les rémanents d'exploitation, en appliquant des chaulages si nécessaire, etc.) ;
8. **Développement d'une culture de gestion des crises** (contre le dépérissement, les ravageurs, les feux, les chablis) à affiner au fur et à mesure des retours d'expérience.

La stratégie de l'ONF insiste par ailleurs sur la nécessité d'une coopération plus étroite avec les instituts de recherche. Sur ce point, sa préférence va à des opérations mixtes de recherche et développement associant l'ONF, l'INRA, AgroParisTech et le Cemagref afin de conduire des études sur l'adaptation forestière et d'en diffuser les résultats directement auprès des gestionnaires forestiers. Les préoccupations et les besoins de ces derniers se répartissent autour de onze axes, à savoir :

- Une information sur le changement climatique à l'échelle locale ;
- De nouveaux protocoles de description des stations adaptés aux conditions environnementales en évolution ;
- En ce qui concerne le choix des essences, une évaluation de l'autécologie, de la productivité et de la vulnérabilité des espèces ;
- Des tests de provenance et d'essences, en particulier de matériel résistant à la sécheresse ;
- L'influence du climat sur la qualité du bois ;
- Des dispositifs de suivi du fonctionnement et de la santé des écosystèmes forestiers ;
- Des modèles de croissance et de rendement prenant en compte les variables climatiques et édaphiques ;
- L'économie de la sylviculture en situation de risque ;
- Les relations entre biodiversité et changement climatique (la gestion des espèces et des espaces protégés, l'utilisation de mélanges d'espèces pour renforcer la résilience et la résistance) ;
- Des directives sylvicoles pour réduire le stress hydrique ;

- Une amélioration du diagnostic et de la gestion des crises.

### 2.3.2.2. Les forêts privées

La **Société Forestière de la Caisse des Dépôts et Consignations** (SFDC) gère des forêts qui appartiennent à des investisseurs institutionnels (237 000 ha en France). Elle a formulé de nouvelles règles de gestion encourageant les espèces à croissance rapide et des révolutions plus courtes (Piermont, 2007). Ce nouveau programme a été institué en 2006 sur la base de prévisions climatiques mais prend également en compte les tendances des marchés et les attentes des clients et de la société. Un ré-examen de ce programme est prévu tous les trois ans. Il s'appuie sur plusieurs principes :

- L'adaptation et la réversibilité : la prise en considération des incertitudes qui existent quant aux prévisions climatiques ;
- La date de référence de 2050 : du fait de l'existence de multiples scénarios climatiques après 2050 en ce qui concerne les sécheresses estivales (le facteur principal pour les peuplements forestiers) ; cette date introduit une dichotomie entre espèces à croissance rapide et espèces à croissance lente, avec, pour ces dernières, une préférence pour les peuplements inéquies et mélangés ;
- Une révolution plus courte, avec des espèces à croissance rapide, afin d'être plus réactif et de diminuer les risques (tempêtes, incendies, etc.) ;
- Une liste d'espèces de transition à même de se développer de manière satisfaisante à la fois sous le climat actuel et sous le climat à venir (la première version de cette liste, qui peut encore évoluer, comprend le pin maritime, le pin laricio, le pin sylvestre, le Douglas, le cèdre de l'Atlas et le sapin de Nordmann pour les résineux, le tilleul, le robinier faux-acacia et l'érable plane pour les feuillus<sup>15</sup>) ;
- A cause des sécheresses estivales attendues, priorité est donnée au critère de la réserve en eau des sols, en lien avec la diminution de la densité des peuplements afin de réduire l'indice de surface foliaire.

Enfin, les autres critères à la base des pratiques sylvicoles de la SFDC, non liés au changement climatique, sont maintenus : les attentes des propriétaires et des clients, la prise en considération des facteurs du marché, la rentabilité, la gestion durable, les diagnostics des peuplements, la prise en considération de l'adaptabilité actuelle des essences aux stations, etc.

Quatre nouvelles orientations ont récemment été ajoutées par la SFDC<sup>16</sup> :

- Une approche plus régionale, afin de prendre en considération les spécificités locales du changement climatique ;
- Une cartographie des risques, accompagnée d'éventuelles mesures d'atténuation massif par massif ;
- La mise à jour de la liste des espèces de transition et l'accroissement de la diversité des peuplements ;
- Une plus grande attention prêtée aux sols forestiers (réserves hydriques) et la prévention du tassement des sols pendant les opérations de débardage.

**De manière plus générale, pour les forêts privées** (environ 12 millions ha en France), les Centres Régionaux de la Propriété Forestière (CRPF) – des institutions publiques créées pour guider et développer la gestion forestière dans les forêts appartenant à des particuliers – ont des « correspondants changement climatique » dont le rôle est de transmettre les informations et de conseiller leurs collègues et les propriétaires privés.

<sup>15</sup> *Pinus pinaster*, *Pinus nigra* subsp. *laricio* var. *corsicana*, *Pinus sylvestris*, *Pseudotsuga menziesii*, *Cedrus atlantica*, *Abies nordmanniana*, *Tilia* sp., *Robinia pseudacacia*, *Acer platanoides*

<sup>16</sup> <http://www.forets-et-climat.fr/>

Des réseaux de stations expérimentales et de démonstration à long terme sont par ailleurs mis en place afin de tester des nouvelles essences et des méthodes de gestion alternatives à des fins d'adaptation et d'atténuation. Un exemple de cette démarche est le projet de recherche et développement sur quatre ans baptisé **CLIMAQ**<sup>17</sup>, dirigé par le CRPF d'Aquitaine avec l'INRA, le FCBA et des gestionnaires de forêts privées. Il est consacré à des espèces potentiellement productives telles que le robinier faux-acacia (*Robinia pseudacacia*), le pin à encens (*Pinus taeda*) et l'eucalyptus (*Eucalyptus* sp), qui sont susceptibles de venir compléter le pin maritime (*Pinus pinaster*) dans le contexte d'instabilité générale des conditions climatiques et des demandes du marché.

## 2.4. La recherche en matière d'adaptation

**La plupart des projets de recherche consacrés aux impacts (actuels ou attendus) du changement climatique proposent des conseils directs et pratiques pour l'adaptation des forêts.** Les directives de l'ONF et de la SFDC abordées plus haut en sont des exemples. De même, le projet CARBOFOR (Lousteau, 2004), à partir de prévisions climatiques et de divers travaux de modélisation, a donné lieu à des recommandations. Là où les effets du changement climatique favorisent les fonctions forestières, dans les forêts boréales, continentales et tempérées septentrionales, les résultats suggèrent que l'optimisation de la gestion forestière devrait tenter de réduire les effets des facteurs limitants, par exemple par des amendements. Inversement, là où le changement climatique doit avoir des effets négatifs en augmentant le déficit hydrique (par exemple dans les forêts tempérées méridionales et méditerranéennes), renforcer la résistance des écosystèmes à la sécheresse et au feu en jouant sur les substitutions d'espèces, le contrôle de l'embroussaillage en sous-bois, la préparation du site et une diminution de l'indice de surface foliaire maximal pourraient constituer des axes stratégiques appropriés. Etant donné que le changement climatique entraîne un changement continu – mais non monotone – de la productivité des stations, la gestion forestière devrait être révisée de manière dynamique tout au long de son cycle. En limite sud des aires de répartition, une gestion visant à adapter les forêts de manière optimale devrait être considérée, donnant la préférence, par exemple, à des peuplements inéquiennes et mélangés incluant les espèces pré-existantes et leurs variants méridionaux en maximisant la biodiversité intraspécifique.

L'institution chargée de la forêt privée, le **Centre National Professionnel de la Propriété Forestière** (CNPPF), a diffusé auprès des propriétaires forestiers des informations générales concernant les bases physiques du changement climatique, les effets actuels et les effets futurs possibles. Beaucoup de questions ont alors été soulevées (« *que dois-je planter ?* »), dont les réponses doivent encore être affinées par les scientifiques. Toutes ces interrogations ont été compilées dans cinq fiches thématiques publiées dans Forêt-Entreprise (Riou-Nivert, 2008) :

- La conduite des peuplements : Comment conduire le diagnostic des peuplements pour connaître leur potentiel ? Devons-nous mettre au point de nouvelles méthodes de sylviculture et si oui, lesquelles ? Devons-nous revoir les techniques d'installation ?
- Le matériel végétal : Comment choisir les espèces ? Qu'en est-il de l'amélioration génétique et de la préservation des ressources génétiques ? ...
- Les stations forestières : Comment prendre en compte le bilan hydrique ? Comment déterminer les stations qui présentent un risque plus élevé pour les peuplements en ce qui concerne le changement climatique ? Qu'est-ce précisément que l'autécologie des espèces ?

<sup>17</sup> <http://www.crpfaquitaine.fr/infos.php#57>

- La gestion des risques : Comment prendre en compte les effets directs et indirects du changement climatique (sécheresses, canicules, tempêtes, incendies, maladies, etc.) dans la gestion sylvicole ? Comment gérer les risques ?
- La production et la récolte : Quelles sont les évolutions quantitatives et qualitatives de la récolte ?

**Des travaux de recherche ciblés sont menés pour répondre à ces interrogations :**

- La cartographie prévisionnelle pour les stations forestières à partir de trois facteurs écologiques (teneur du sol en nutriments, teneur du sol en eau et bioclimat – intégrant la température et le bilan hydrique) (Gegout *et al.*, 2008) ; en Champagne-Ardenne, dans le nord-est de la France, des gestionnaires forestiers ont également tenu compte du changement climatique dans leurs types de stations forestières et ont produit de nouveaux guides (Gaudin, 2007) ;
- Le projet DRYADE (paragraphe 1.1.3.2), encore en cours, donnera lieu à des recommandations conseillant aux gestionnaires forestiers de prendre en compte la sécheresse et ses conséquences sur le dépérissement par le biais d'un plan de gestion prospectif (espèces et variétés, objectifs, renforcement de la résilience des peuplements) ou d'un allègement des contraintes (sylviculture adaptée, lutte contre les maladies et les ravageurs) ;
- Le groupement d'intérêt scientifique (GIS) sur le « pin maritime du futur », qui regroupe le FCBA, l'INRA, le CRPF et l'ONF en Aquitaine, travaille sur l'amélioration génétique du pin maritime (*Pinus pinaster*) ; un des nouveaux critères d'amélioration utilisés dans ce cadre est l'adaptation des variétés actuelles ou nouvelles à la sécheresse (Alazard, 2006).

Confrontés aux incertitudes en matière de prévisions climatiques, de capacités adaptatives naturelles des espèces et d'inertie des forêts, les propriétaires forestiers et les gestionnaires restent prudents et adoptent des stratégies « sans regrets » ou réversibles (temps de révolution plus courts, mélange d'espèces, etc.). Des stratégies de gestion des incertitudes doivent être élaborées, basées sur une gamme de plusieurs scénarios du plus au moins pessimiste. Ces scénarios exploreraient tous les futurs envisageables en analysant et en évaluant toutes les actions possibles, à différentes échelles mais surtout à l'échelle locale pour assurer une meilleure adaptation (Legay *et al.*, sous presse). Tant que les techniques déterministes ne conviendront pas parfaitement et que les processus de décision en situations d'incertitude ne seront pas adaptés aux besoins particuliers de la gestion forestière, le sentiment de vulnérabilité ira se renforçant.

### 3. L'atténuation

La filière forêt-bois est particulièrement mise en exergue par les sylviculteurs français comme un outil important pour l'atténuation du changement climatique. Un rapport publié en 2003 sur la compétitivité de cette filière comme enjeu du développement durable commençait de fait par un chapitre consacré à la séquestration du carbone (Juillot, 2003). Qui plus est, au cours de la présidence française du Conseil de l'Union Européenne (second semestre 2008), une conférence internationale sur le rôle du secteur forestier dans l'atténuation a été organisée à Nancy par le Ministère chargé de l'Agriculture<sup>18</sup>.

Le volet forestier de l'atténuation est grandement tributaire des politiques climat-énergie à l'échelon international et des marchés de l'énergie. Il en découle que beaucoup d'incertitudes sont en jeu concernant les impacts futurs et l'adaptation. Qui plus est, les possibilités d'atténuation dépendent également de l'adaptation des forêts.

Alors que la séquestration du carbone est devenue un nouveau service écologique, des conflits d'usage sont susceptibles de naître avec d'autres fonctions de l'écosystème forestier en cas d'utilisation intensive.

#### 3.1. *La comptabilisation du carbone*

##### 3.1.1. Le Protocole de Kyoto et la position de la France

Le **Protocole de Kyoto** est un accord international lié à la Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (CCNUCC, en anglais UNFCCC<sup>19</sup>). Il a été adopté à Kyoto, au Japon, le 11 décembre 1997 et est entré en vigueur le 16 février 2005. A ce jour, ce Protocole a été ratifié par 184 Parties à la Convention. Les règles détaillées devant régir sa mise en application ont été adoptées à Marrakech en 2001 (CdP 7) sous l'appellation des « Accords de Marrakech ».

La principale caractéristique du Protocole de Kyoto est qu'il fixe des objectifs ayant force obligatoire pour que 37 pays industrialisés et la Communauté Européenne réduisent de 5,2% leurs émissions de gaz à effet de serre par rapport à leur niveau de 1990 au cours de la période 2008-2012. Reconnaisant que les pays développés sont les principaux responsables des niveaux actuels élevés d'émissions de gaz à effet de serre dans l'atmosphère après plus de 150 années d'activité industrielle, le Protocole impose une charge plus lourde sur les nations développées (les pays figurant à l'Annexe I du Protocole de Kyoto, dont la France) selon le principe de la « responsabilité commune mais différenciée ». Les Parties figurant à l'Annexe I sont requises de soumettre chaque année un rapport d'inventaire national et des tableaux présentés conformément au cadre uniformisé de présentation et contenant les données depuis l'année de référence jusqu'à deux ans avant l'année de la soumission.

Les 15 pays de l'Union Européenne (avant les deux derniers élargissements) ont mis sur pied un système permettant d'échanger les droits d'émission de gaz à effet de serre au sein de la Communauté, dans le respect des mécanismes du Protocole de Kyoto. L'Union Européenne doit réduire de 8% ses émissions de gaz à effet de serre au cours de la période 2008-2012. Dans le cadre de ce système, chaque pays associé a des objectifs différents

---

<sup>18</sup> Titre complet de cette conférence : «La filière bois européenne : des bio-réponses aux nouveaux enjeux climatiques et énergétiques ?»

<sup>19</sup> <http://unfccc.int>



tenant compte de sa situation particulière (perspectives de croissance économique, proportions des différents types d'énergie, industries, etc.). Ainsi **la France doit-elle maintenir ses propres émissions au niveau de 1990** sans avoir à les diminuer de 8%.

Les forêts, par le développement des arbres et l'accroissement du carbone du sol, contiennent une grande partie du carbone piégé sur les terres émergées. Elles représentent un stock de carbone significatif à l'échelle mondiale. Ainsi plusieurs articles du Protocole de Kyoto prévoient-ils d'assimiler les activités liées à l'Utilisation des Terres, aux Changements d'Affectation des Terres et à la Foresterie (UTCF) à des efforts déployés par les Parties pour mettre en application le Protocole et contribuer à l'atténuation du changement climatique. De cette manière, les Parties figurant à l'Annexe I, dont la France, mettront en œuvre et/ou affineront des politiques et des mesures pour protéger et développer les puits et les réservoirs de gaz à effet de serre, promouvoir la gestion durable des forêts, les boisements et reboisements ainsi que les formes durables d'agriculture.

Aux termes de l'Article 3, paragraphes 3 et 4, les Parties figurant à l'Annexe I doivent faire connaître leurs émissions, source par source, et leurs séquestrations, puits par puits, de gaz à effet de serre en rapport avec leurs activités UTCF (Chaudron *et al.*, 2005). **Conformément à l'Article 3.3 du Protocole de Kyoto**, les Parties ont décidé que les variations nettes de quantités de gaz à effet de serre émises par les sources et fixées dans les puits par le biais d'UTCF directement liées à l'action de l'homme – activités restreintes aux boisements, reboisements et déforestations mis en œuvre depuis 1990 – pourraient être assimilées à une contribution des Parties envers leurs engagements en matière de réduction des émissions. **Conformément à l'Article 3.4** du Protocole de Kyoto, les Parties peuvent choisir d'autres activités humaines liées à l'UTCF - gestion forestière, gestion des terres cultivées, gestion des pâturages et végétalisations - pour qu'elles soient incluses dans la comptabilisation des émissions et des séquestrations anthropiques de gaz à effet de serre pour la première période d'engagement. Si une Partie – telle que la France – fait un tel choix, alors cette comptabilisation reste effective pour toute la durée de la première période d'engagement. Les évolutions touchant au stock de carbone et aux émissions de gaz à effet de serre liés aux activités d'UTCF aux termes de l'Article 3, paragraphes 3 et 4, doivent être signalées chaque année de la période d'engagement, en commençant au début de celle-ci ou au début de l'activité en question si cette dernière est postérieure. Lorsque les activités d'UTCF aux termes des Articles 3.3 et 3.4 se traduisent par une séquestration nette de gaz à effet de serre, une Partie figurant à l'Annexe I a la possibilité de délivrer des unités d'absorption résultant de ces activités et de les comptabiliser dans sa contribution envers ses engagements aux termes de l'Article 3.1.

### 3.1.2. La comptabilisation du carbone en France

En France, la déclaration des émissions de gaz à effet de serre est effectuée par une association, le Centre Interprofessionnel Technique d'Etudes de la Pollution Atmosphérique (CITEPA). En ce qui concerne la part liée aux activités forestières, elle centralise les résultats provenant des divers réseaux d'observation. Les résultats sont transmis à la CCNUCC qui publie les données pour la France sur son site Internet<sup>20</sup>. Lorsque sont prises en compte les surfaces boisées qui le restent ainsi que les surfaces autres (cultivées, pâturées, marécageuses, urbanisées, etc.) qui sont converties en forêts, on obtient les émissions nettes du secteur forestier français qui figurent dans le Tableau 4 ci-dessous. Pour la première période du Protocole de Kyoto (2008-2012), les Accords de Marrakech octroient à la France des droits d'émissions ne pouvant dépasser 3,2 Mt de CO<sub>2</sub> par an, à condition que les réserves de carbone forestières continuent à s'accroître.

<sup>20</sup> <http://unfccc.int> puis GHG data/GHG data UNFCCC/flexible queries

Tableau 4 : Les émissions de gaz à effet de serre par le secteur forestier français en Gg CO<sub>2</sub><sup>21</sup>. Les valeurs négatives correspondent à des séquestrations.

Année	1990	1995	2000	2005	2006
Gg CO <sub>2</sub>	- 60 561	- 66 822	- 69 570	- 79 930	- 84 016

Des discussions sont encore en cours au sujet de l'éventuelle prise en compte des stocks de carbone dans les produits bois. Le projet Carbostock (Deroubaix *et al.*, 2008), par exemple, a mis au point une méthodologie pour quantifier les variations de stocks de carbone dans les produits bois dans la limite des règles du GIEC. Cette étude a analysé cinq stocks de carbone en aval de la forêt, dans les secteurs de la filière bois et de la filière papetière : habitat, ameublement, emballage, énergie, pâte à papier et papier. Pour chacun de ces secteurs, les stocks ont été recensés (stocks intermédiaires techniques et stocks en service) puis quantifiés en utilisant trois approches différentes définies par le GIEC : les changements de stock, la production et les flux atmosphériques. Le résultat quantitatif varie en fonction de la méthode utilisée de -4,709 Gg CO<sub>2</sub>/an (changements de stocks) à +452 Gg CO<sub>2</sub>/an (flux atmosphériques). La méthode qui sera finalement entérinée dépend de choix politiques internationaux.

### 3.2. *Processus politiques, instruments et stratégies pour l'atténuation*

L'un des principaux acteurs de l'atténuation en France a été la **Mission Interministérielle sur l'Effet de Serre (MIES<sup>22</sup>)**. Créée en 1992 et rattachée au Premier Ministre, la MIES avait en charge la coordination des actions de la France en matière de lutte contre l'effet de serre, à l'échelle nationale, européenne et internationale. Cette mission devait élaborer, mettre à jour et appliquer toutes ces mesures. La MIES a récemment été remplacée par le Département de Lutte Contre l'Effet de Serre (DLCES) du Ministère en charge du Développement Durable (MEEDDM-CGDD).

En 2004, la MIES avait conçu le « Plan Climat », le plan d'action gouvernemental pour atteindre – voire dépasser - les objectifs fixés par le Protocole de Kyoto. Ce plan rassemble toutes les mesures d'atténuation relevant de l'ensemble des secteurs économiques comme de la vie quotidienne dans le but de parvenir à une diminution de 54 Mt d'équivalents-CO<sub>2</sub> par an jusqu'en 2010. Ce plan, optimiste, a lui-même des objectifs plus ambitieux que le Protocole de Kyoto. Il propose des mesures réalistes faciles à appliquer dans la vie quotidienne pour motiver l'ensemble de la population au sein d'une sorte de mouvement citoyen. Huit orientations majeures ont été définies :

- Une campagne d'information nationale sur le changement climatique ;
- Les transports durables ;
- L'éco-construction ;
- L'industrie, l'énergie et les déchets ;
- L'agriculture durable et les forêts ;
- La climatisation durable ;
- Les plans climat territoriaux et l'Etat exemplaire ;
- La recherche et la prospective pour après 2010.

En ce qui concerne le secteur forestier, la principale mesure du Plan Climat et de promouvoir et de développer l'utilisation de la biomasse, notamment les bio-carburants, le bois-énergie et le bois dans le bâtiment. Les forêts sont considérées comme des puits de carbone.

<sup>21</sup> <http://unfccc.int> puis GHG data/GHG data UNFCCC/flexible queries

<sup>22</sup> <http://www.effet-de-serre.gouv.fr>

En 2006, un rapport intitulé « **Division par quatre des émissions de gaz à effet de serre de la France à l'horizon 2050** » a été rédigé par un groupe de travail dirigé par C. de Boissieu à la demande des Ministres de l'Industrie et de l'Ecologie (de Boissieu, 2006). Comme son titre l'indique, l'objectif est de diviser par quatre les émissions françaises de gaz à effet de serre (de 140 Mt en 1990 à 38 Mt de carbone par an en 2050) afin de limiter les concentrations atmosphériques de CO<sub>2</sub> à 450 ppm, ce qui semble l'objectif le plus réaliste lorsque l'on tient compte de la concentration actuelle (382 ppm) et de l'accroissement annuel (+ 2 ppm par an). Cet objectif avait été fixé par une loi, adoptée en 2005, qui définit les orientations de la France en matière de politique énergétique. Le rapport détaille la stratégie nationale et les recommandations techniques pour y parvenir et souligne la dimension sociale de cette stratégie (comportement citoyen). En ce qui concerne la forêt et la filière bois, les recommandations sont essentiellement les mêmes que celles du Plan Climat.

Récemment, un des neuf enjeux identifiés dans la première version de la Stratégie Nationale pour le Développement Durable en cours (SNDD, chapitre 2.2) concerne la capacité adaptative des territoires locaux et leur contribution à l'atténuation. Plus précisément, un des objectifs est de promouvoir la séquestration du carbone dans les forêts et l'utilisation du bois.

En lien avec ces plans généraux, les processus du Grenelle de l'Environnement puis des Assises de la Forêt ont établi des objectifs plus précis et plus réalistes pour la forêt et la filière bois afin d'adapter les forêts au changement climatique (ainsi qu'il en est question au chapitre 2.3.1), mais également de contribuer à son atténuation. L'accroissement de la récolte annuelle (+21 Mm<sup>3</sup> en 2020, avec une récolte actuelle d'environ 60 Mm<sup>3</sup>/an) est le premier de ces objectifs. Promouvoir l'utilisation du bois local (en tant que matériau et énergie renouvelable), améliorer les certifications forestières (FSC et PEFC) notamment pour le bois employé dans les bâtiments publics (à partir de 2010, 100% du bois acheté par l'Etat français devra être certifié), rendre obligatoire la certification du bois importé, promouvoir le bois comme matériau respectueux de l'environnement pour la construction, adapter les normes du bâtiment au matériau bois, etc. constituent quelques-uns des objectifs touchant au bois en tant qu'éco-matériau. Si d'autres objectifs concernent l'amélioration de l'utilisation du bois-énergie, la priorité est toutefois donnée au bois-matériau.

Ainsi qu'il a été mentionné plus haut (chapitre 2.2), des politiques régionales ont également été développées dans plusieurs régions du pays dans le cadre des plans d'action pour le climat baptisés Plans Climat. Certains de ces plans, tels que celui de la région Aquitaine, comportent un volet spécifiquement consacré aux forêts, comprenant des mesures d'adaptation et une contribution aux stratégies d'atténuation par le soutien des systèmes bio-énergétiques, les marchés volontaires du carbone et l'utilisation du bois dans la construction.

### **3.3. La foresterie comme source de bio-énergie**

La promotion de la foresterie en tant que source de bio-énergie étant l'une des principales mesures proposées par les divers processus et stratégies politiques, beaucoup de projets nationaux et locaux sont en cours depuis plusieurs années. Les plus importants d'entre eux sont mentionnés ci-dessous.

L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME<sup>23</sup>) a mis en oeuvre de 2000 à 2006 un programme bois-énergie avec les objectifs suivants :

- Maintenir à 8 Mt d'équivalents-pétrole la consommation domestique de bois-énergie (essentiellement sous forme de bûches) ;

---

<sup>23</sup> <http://www.ademe.fr>

- Améliorer de 10% l'efficacité énergétique et la performance environnementale des chaudières individuelles (des crédits d'impôts existent d'ailleurs pour les modèles les plus efficaces) ;
- Installer 1000 chaufferies collectives et industrielles pour une puissance globale de 1000 MW en améliorant la technologie et en organisant le marché de l'approvisionnement.

A la fin de 2006, 1880 chaudières avaient été installées, pour une puissance totale de 675 MW. Un nouveau programme a donc été lancé pour la période 2007-2010 avec un champ d'application élargi à la bio-énergie en général (bois, paille, cultures bio-énergétiques, etc.), mais dont les objectifs concernant le bois-énergie étaient pratiquement inchangés. L'objectif actuel est de substituer 80 000 t d'équivalents-pétrole de combustible fossile par an par diverses énergies renouvelable, notamment les plaquettes forestières. Seules les chaufferies de plus de 1 MW sont désormais concernées.

Un programme complémentaire de la **Fédération Nationale des Communes Forestières (FNCOFOR)** baptisé « **1000 chaufferies bois pour le milieu rural** » a été lancé pour l'installation de chaufferies à petite échelle dans les communes rurales. Dans le cadre de ce programme, un plan local d'approvisionnement en bois a été mis au point et testé en 2007-2008 pour être opérationnel en 2009.

D'autres programmes, de plus grande envergure, concernent la production d'électricité et la cogénération. Une loi définissant les orientations de la France en matière de politique énergétique a été adoptée en 2005 avec une planification jusqu'en 2010 :

- La production d'électricité issue de sources renouvelables doit atteindre 21% de la consommation française ;
- L'utilisation des énergies renouvelables constitue une priorité et doit augmenter de 50% pour ce qui est de la production de chaleur.

Les investissements dans la production d'électricité à partir de la biomasse sont planifiés à l'échelle nationale ; ils devront représenter 1000 MW en 2010 et 2000 MW en 2015. Dans le cadre de ce plan, deux appels à projets ont été lancés en 2004 et 2006 par le Ministère de l'Industrie (**Commission de Régulation de l'Energie**, CRE). Vingt-deux nouvelles centrales à biomasse ont été acceptées et devraient consommer 1 Mt de plaquettes forestières et 250 000 t de broyats de bois et assimilés. Un troisième appel à projets a été lancé au début de 2009, dont les résultats devraient être connus sous peu.

Au vu de l'ampleur de ces projets, la question qui se pose est celle de la disponibilité en bois-énergie. Le CEMAGREF a donc mené en 2006 et 2007, à la demande du Ministère de l'Agriculture, une étude sur les **disponibilités en biomasse forestière pour des usages énergétiques et industriels en France** aux horizons 2010 puis 2020 (Ginisty *et al.*, 2007; Vallet *et al.*, 2008). Ce travail vise à estimer à l'échelle nationale les quantités de biomasse-bois qu'il pourrait être possible d'extraire des forêts, en sus du niveau de prélèvement actuel, tout en restant compatible avec une gestion durable et rationnelle des ressources forestières. Le CEMAGREF a mis au point une technique de diagnostic des peuplements sur pied en comparant les données de l'Inventaire Forestier National (IFN) avec les préconisations de sylviculture figurant dans les guides en ce domaine. Le bois des taillis, des premières éclaircies et des houppiers sont au nombre des compartiments pour lesquels cette étude a produit des estimations. Les disponibilités supplémentaires théoriques estimées de bois énergie et bois d'industrie dépassent les 17 Mm<sup>3</sup>/an – un résultat toutefois fortement lié aux hypothèses de calcul. Par extension, le bois d'oeuvre disponible est quantifié par région, par essence et par niveau d'accessibilité. Le volume théorique estimé de bois d'oeuvre disponible est d'environ 11,5 Mm<sup>3</sup>/an. Ce travail s'est poursuivi en 2008 et 2009, avec l'IFN et l'ONF afin d'exploiter les données issues de la nouvelle méthode d'inventaire de l'IFN, appliquée depuis 2005. Il devrait en résulter une meilleure estimation de la disponibilité en bois d'oeuvre sur la base d'informations plus à jour, tenant compte des effets des tempêtes de 1999.

Il reste que l'accroissement des prélèvements de bois pourraient avoir des conséquences sur la biodiversité forestière, notamment sur la biodiversité en insectes liés au bois mort. ECOFOR a coordonné en 2008 l'expertise « **Biomasse et Biodiversité** » (Bio2) visant à spécifier comment récolter à la fois plus et mieux. Quelques-unes des principales recommandations qui en découlent proposent de délimiter des zones non récoltées dans les secteurs à haute biodiversité, de laisser une part du bois mort sur place, de préserver les propriétés physiques et chimiques du sol pendant les opérations de débardage, etc. (Landmann *et al.*, sous presse). Un nouveau programme (Biomadi) doit combler les lacunes de cette première expertise.

### **3.4. La recherche en matière d'atténuation**

Au cours de l'année 1999, une initiative concertée française a été à l'origine du programme de recherche « **Gestion et Impacts du Changement Climatique** » (GICC). Ce programme est essentiellement géré par le Ministère chargé du Développement Durable (MEEDDM<sup>24</sup>) en étroite collaboration avec l'ADEME et l'ONERC. La mission du programme GICC est de promouvoir et de développer la recherche scientifique sur le recensement des « impacts du changement climatique » nationaux et des mécanismes physiques qui leur sont associés. L'objectif principal, en aval, est de fournir des arguments scientifiques solides pour contribuer à la mise au point d'outils et de techniques d'adaptation, permettant ainsi aux décideurs du secteur public d'optimiser des stratégies pour la prévention et l'atténuation des impacts.

**CARBOFOR** (Lousteau *et al.*, 2004), soutenu par le programme GICC, a été l'un des premiers projets de recherche qui ait fourni des données sur les stocks et les flux de carbone forestiers (biomasse et sols). Les réponses des différents types de couverts aux déterminants environnementaux et biophysiques ont été analysées à partir des informations provenant du réseau français de sites Flux sur lesquels les flux de CO<sub>2</sub> et H<sub>2</sub>O ont été suivis depuis 1996. Les comportements des différents types de couvert considérés en termes d'échanges d'énergie, d'eau et de carbone dépendent peu des espèces constitutives mais beaucoup plus du climat et de la structure du couvert. En particulier, l'Indice de Surface Foliaire (*Leaf Area Index*, LAI), la biomasse sur pied, la hauteur et la structure verticale du peuplement, et la densité des tiges ont une influence considérable. La production primaire brute (PPB) oscillait entre 1000 et 2500 gC/m<sup>2</sup>/an (soit entre 10 et 25 tC/ha/an). La respiration de l'écosystème (RE) était la première cause des variations inter-annuelles et inter-sites de la NEE (respiration nette de l'écosystème, *Net Ecosystem Respiration*), au moins les années humides : les valeurs basses de la NEE correspondaient aux valeurs élevées de la RE. Cette dernière comprend des composantes autotrophes et hétérotrophes. Leurs déterminants sont nombreux et leur influence respective difficile à départager et à quantifier. Les régimes de coupe et de régénération telles que le taillis ou la coupe à blanc déterminent la structure en classes d'âge des peuplements forestiers, leur Indice de Surface Foliaire et leur biomasse sur pied, ce qui a de puissantes répercussions sur le fonctionnement et la variabilité inter-annuelle de l'écosystème.

**Les pratiques forestières devraient optimiser la séquestration du carbone par les forêts et la filière bois** et promouvoir la réduction des émissions de gaz à effet de serre. L'association France-Forêts, un regroupement d'acteurs publics et privés de la gestion forestière, a sollicité le Laboratoire d'Etude des Ressources Forêt-Bois de l'INRA-AgroParis Tech pour qu'il étudie comment adapter les pratiques à ces nouveaux objectifs (Robert *et al.*, 2008).

---

<sup>24</sup> <http://www.environnement.gouv.fr>

Le travail analytique de ces recherches repose sur des chaînes de modèles (Vallet, 2005 ; Robert *et al.*, 2008) mises au point pour simuler l'effet des divers types de pratiques sylvicoles sur la fixation du carbone dans les arbres sur pied et dans les produits du bois, d'une part, et, d'autre part, sur les variations des niveaux d'émission de gaz à effet de serre lorsque du bois est utilisé à la place d'autres matériaux ou d'autres formes d'énergie. Sur la base de simulations de futaies régulières de chênes pédonculés (*Quercus robur*), hêtre (*Fagus sylvatica*), pin laricio (*Pinus nigra subsp. laricio var. corsicana*) et Douglas (*Pseudotsuga menziesii*) en France, il a été démontré que la plantation de forêts issues de semis sur des terres agricoles ou sur des prairies permet, quel que soit le système de gestion utilisé, une fixation de carbone. Le carbone séquestré dans la biomasse est plus important sur sol fertile et dans les peuplements denses.

La quantité de carbone stockée dans les produits du bois est relativement faible comparée à la quantité de carbone stockée dans les forêts elles-mêmes. Deux grands facteurs ont un effet positif sur le puits de carbone que constituent les produits du bois. Le premier est l'accroissement du volume des produits eux-mêmes et le second est l'allongement de leur durée de vie moyenne. Les scénarios de gestion sylvicole favorisant une fixation accrue de carbone dans les produits du bois sont ceux qui permettent la production de vastes quantités de bois, dont une proportion importante peut être employée dans la construction ou l'ameublement. La substitution du bois aux autres matériaux de construction et aux combustibles fossiles entraîne, dans la plupart des cas, une réduction des émissions de gaz à effet de serre. Cet effet est renforcé lorsque les produits du bois sont recyclés. L'effet de substitution le plus important, dans le contexte des technologies actuelles, est obtenu dans les peuplements qui produisent les plus grandes quantités de bois de qualité. Dans les futaies équiennes de chênes, les scénarios entraînant les effets de substitution les plus puissants sont les suivants :

- Dans les peuplements sur substrat peu fertile, les scénarios qui fixent un diamètre cible important (> 70 cm, tels que dans les pratiques actuelles) ;
- Dans les peuplements sur substrat fertile, les scénarios qui fixent un diamètre cible moyen (de presque 50 cm).

Ces conclusions soulignent qu'utiliser du bois d'œuvre de plus petite taille issu de révolutions plus courtes peut être une manière d'utiliser le secteur de la forêt et du bois pour limiter les émissions planétaires de gaz à effet de serre. Le degré de certitude de la production est ici un paramètre important. Dans un environnement incertain (risques de tempêtes ou de sécheresses), les conclusions pourraient conduire à recommander une réduction plus importante encore de la durée de révolution.

## 4. Conclusion

Les impacts constatés jusqu'à aujourd'hui sont liés au forçage radiatif et au changement climatique, mais également à plusieurs autres phénomènes tels que les dépôts d'azote. Ces derniers ont ainsi joué un rôle prépondérant dans l'augmentation observée de la croissance et de la productivité des forêts. Il reste que, au vu de l'augmentation de la température moyenne et des périodes de sécheresse que prévoient tous les scénarios d'émission de gaz à effet de serre, le changement climatique deviendra à l'avenir le principal facteur responsable de ces transformations. De nombreuses incertitudes demeurent cependant au sujet de l'évolution du climat : qu'en sera-t-il exactement ? Des différences marquées existent en outre d'un scénario à l'autre, et leurs effets locaux devraient être modélisés avec plus de précision.

Une référence française en matière d'impacts est le projet CARBOFOR, qui a produit une cartographie des futures aires de répartition des principales espèces forestières (pour la fin du 21<sup>ème</sup> siècle). Les propriétaires et gestionnaires forestiers, et tous les professionnels de la forêt en général, ont pris conscience des impacts potentiels du changement climatique. Toutefois, ces résultats proviennent de modèles statistiques de niches écologiques, qui ne tiennent pas compte des facteurs biologiques tels que la compétition et la phylogénèse et qui négligent donc la capacité naturelle des espèces et des forêts à s'adapter.

Devant de telles incertitudes, les propriétaires et gestionnaires forestiers optent pour une stratégie d'attente prudente, « sans regrets ». Ils se posent encore bien des questions sur la manière de faire évoluer la conduite des peuplements, les stations forestières ou le matériel végétal... Il en résulte que de réelles mesures d'adaptation n'ont encore été effectivement mises en œuvre que sur un nombre restreint de sites forestiers, malgré la multiplicité des processus politiques qui ont été lancés aux niveaux national (Grenelle de l'Environnement, Assises de la Forêt, etc.) et régional (Plans Climat).

En effet, nombreux sont les processus politiques qui s'intéressent à l'atténuation. Dans la mesure où seulement deux tiers de l'accroissement biologique annuel des forêts sont récoltés à l'heure actuelle, à des fins d'énergie et de construction, un des principaux objectifs fixés est d'augmenter les prélèvements annuels de bois (+12 millions de m<sup>3</sup> en 2012 et +20 millions de m<sup>3</sup> en 2020). Dans un discours récent, le Président français N. Sarkozy, s'inspirant d'un rapport commandé à Puech (2009) sur ce sujet, a insisté sur cet aspect des choses en proposant de multiplier par dix l'utilisation du bois dans le bâtiment.

Toutefois, l'atténuation de l'effet de serre par les forêts pourrait être gravement compromise si les impacts du changement climatique sont trop brutaux ou si les événements climatiques extrêmes deviennent trop fréquents, faisant passer les forêts du statut de puits à celui de source de carbone - comme ce fut le cas à l'occasion de la sécheresse de 2003 et des tempêtes de 1999 et de 2009. Pour préserver son rôle d'atténuateur, l'adaptation forestière doit absolument s'appuyer sur une gestion qui sache prévenir les risques de tempêtes, de sécheresses, d'incendies et d'infestations de ravageurs ou de pathogènes. L'issue de l'enjeu dépend pour l'essentiel des efforts de recherche en matière d'impacts du changement climatique, mais également des capacités d'investissement et de la bonne volonté des propriétaires forestiers. Les stratégies d'adaptation sont elles-mêmes en constante évolution et intègrent au fur et à mesure les nouvelles connaissances provenant des activités de recherche.

Le présent rapport sera remis à jour avant la fin de l'Action COST ECHOES, notamment en intégrant les résultats des nombreux projets en cours.

## Références bibliographiques

ALAZARD P. (2006). Le Groupe Pin maritime du Futur. AFOCEL, Informations-Forêt, fiche n°723. 6 p.

Anonyme (2006). Le Programme Forestier National. Ministère de l'Agriculture et de la Pêche, Conseil Supérieur de la Forêt, des Produits Forestiers et de la Transformation du Bois. 14 p.

Anonyme (2008). Le marché du bois en France – Situation actuelle et perspectives à court terme. Comité du bois – Commission Economique pour l'Europe des Nations Unis, 66<sup>ème</sup> session. Ministère de l'Agriculture et de la Pêche – Direction générale des politiques agricole, agroalimentaire et des territoires – Service de la forêt, de la ruralité et du cheval – Sous-direction de la forêt et du bois - Bureau du Développement Economique. 22 p.

ARCHAUX F., WOLTERS V. (2006). Impact of summer drought on forest biodiversity: what do we know?. *Ann. For. Sci.* 63, pp 645-652.

BABILLOT P., GILLET M. (2007). Stratégie nationale d'adaptation au changement climatique. Ministère de l'Ecologie, du Développement et de l'Aménagement Durable, Observatoire national des effets du réchauffement climatique (ONERC). La Documentation Française, 95 p.

BARTHOD C., BARRILLON A. (2002). Government Support for Forests; The Government Relief Program. Numéro Spécial 3après les tempêtes, un nécessaire bilan”, *Revue Forestière Française*.

BIROT Y., TERRASSON D., FORMERY T., ROMAN-AMAT B., LAROUSSINIE O., DROUINEAU S. (2000). Expertise collective sur les tempêtes, la sensibilité des forêts et sur leur reconstitution. INRA, CEMAGREF, ECOFOR, 28 p.

BIROT Y., PEYRON J.-L. (2009). Les écosystèmes forestiers européens face aux événements climatiques extrêmes. *Académie des sciences* (sous presse).

DE BOISSIEU C. (coordinateur) (2006). Rapport du Groupe de travail « Division par quatre des émissions de gaz à effet de serre de la France à l'horizon 2050 ». Ministère de l'Economie, des Finances et de l'Industrie, Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable. 59 p + annexes.

BONTEMPS JD (2006). Evolution de la productivité des peuplements réguliers et monospécifiques de hêtre (*Fagus sylvatica* L.) et de chêne sessile (*Quercus petraea* Liebl.) dans la moitié Nord de la France au cours du XXe siècle. Doctorat Sciences Forestières, LERFoB, ENGREF.

BOURGAU JM, LERAT JF, CAILMAIL F. (2007). Adaptation de la gestion des forêts au changement climatique. Ministère de l'Agriculture et de la Pêche, Conseil Général de l'agriculture, de l'alimentation et des espaces ruraux. Mission n°1223, 56 p.

BREDA N., HUB 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. *Ann. For. Sci.* 63, pp 625-644.



CANDAU JN (2008). Impact du changement climatique sur les insectes ravageurs des forêts méditerranéennes. Forêt Méditerranéenne, numéro spécial Changements climatiques et forêt méditerranéenne, Tome XXIX n°2, juin 2008, pp 145-154.

Commission Ressources Génétiques Forestières (CRGF) (2008). Préserver et utiliser la diversité des ressources génétiques forestières pour renforcer la capacité d'adaptation des forêts au changement climatique. Ministère de l'Agriculture et de la Pêche, DGPAAT, Sous-direction de la Forêt et du Bois. 4 p.

CHAUDRON A., MOREL MP, MERCKX V., GABORIT G. (2005). L'entrée en vigueur du Protocole de Kyoto le 16 février 2005 : quelles implications pour les forêts françaises ? Revue Forestière Française LVII, n°6-2005. pp 479-495.

CHUINE I., YIOU P., VIOVY N., SEGUIN B., DAUX V., LE ROY LADURIE E. (2004). Grape ripening as a past climate indicator. Nature, vol. 432, 18 Novembre 2004, pp 289-290.

CHUINE I. (2005). Un réseau d'observatoires phénologiques pour la gestion du changement climatique. De l'observation des écosystèmes forestiers à l'information sur la forêt, Paris, 02-03 fév. 2005, pp 49-58.

CHUINE I., SEGUIN B. (2008). Système d'Information Phénologique pour l'Etude et la Gestion des Changements Climatiques (SIP-GECC). Rapport annuel d'activités 2007 du GDR 2968. 38 p.

Commissariat Général au Développement Durable (sous presse). Stratégie nationale du développement durable 2009-2012. Version provisoire. CGDD-MEEDDAT. 47 p.

DESHAYES M., GUYON D., JEANJEAN H., STACH N., JOLLY A., HAGOLLE O. (2006). The contribution of remote sensing to the assessment of drought effects in forest ecosystems. Ann. For. Sci. 63, pp 579-595.

DEROUBAIX G., LE-NET E., THIVOLLE-CAZAT A., VIAL E., BOUVET A., MALSOT J., CHENOST C. (2008). Carbone stocké dans les produits bois – Conception d'une méthodologie de quantification des variations de stock dans les produits du bois répondant aux exigences du GIEC et application à l'année 2005 pour un rapportage volontaire dans le cadre de la Convention Cadre des Nations Unies sur le Changement Climatique. Etude CARBOSTOCK. Convention FCBA-MAP n°G13-2007. FCBA, Ernst&Young.

DESPREZ-LOUSTAU ML, ROBIN C., REYANUD G., DEQUE M., BADEAU V., PIOU D., HUSSON C., MARCAIS B. (2007). Simulating the effects of a climate change scenario on geographical range and activity of forest pathogenic fungi. Can J Plant Pathol. 29(2), pp 101-120.

DUPOUEY JL (2005). Dynamique de la végétation dans les forêts de montagne : impact des changements climatiques.

GAUDIN S. (2007). Prise en compte du changement climatique dans les guides et catalogues de stations : première approche. CRPF de Champagne-Ardenne, Châlons-en-Champagne, 16 p. et annexes.

GÉGOUT JC, PIEDALLU C., CORNU JF, CLUZEAU C. (2008). Predictive mapping for forest sites - A new tool for forest managers. Revue Forestière Française, Vol. 60, N° 1, pp 37-60.

GINISTY C., VALLET P., CHABE-FERRET S., LEVESQUE C., CHAUVIN C. (2007). Disponibilités en biomasse forestière pour des usages énergétiques et industriels en France. Convention DGFAR/Cemagref E 19 / 06 du 20 octobre 2006. CEMAGREF, 124 p.

GUIOT J., GUIBAL F., HUC R., MISSON L., RAMBAL S., RATTE JP, VENNETIER M. (2007). Response of the French Mediterranean forests to climatic changes (REFORME). Rapport de fin de contrat, APR GICC 2003. CNRS, Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable, CEREGE. 20 p.

JUILLOT D. (2003). La filière bois française : la compétitivité, enjeu du développement durable. Revue Forestière Française, LV 3-2003. pp 191-295.

LANDMANN G., GOSELIN F., BONHEME I (coordinateurs) (sous presse). Biodiversité, ressources naturelles et utilisation accrue de la biomasse forestière. Résultats de l'étude « Bio 2 ». Rapport réalisé sous la coordination du Gip Ecofor à la demande du ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de l'Aménagement du territoire. Subvention n°000 112. Décembre 2008.

LEBOURGEOIS F., PIERRAT JC, PEREZ V., PIEDALLU C., CECCHINI S., ULRICH E. (2008). Déterminisme de la phénologie des forêts tempérées françaises : étude sur les peuplements du réseau Renécofor. Revue Forestière Française, LX n°3-2008, pp 323-343.

LEGAY M., MORTIER F. (2006). La forêt face au changement climatique – Adapter la gestion forestière. Synthèse de l'atelier ONF/INRA du 20 octobre 2005. ONF, INRA. Les Dossiers forestiers, n°16, juin 2006, 2<sup>ème</sup> édition. 39 p.

LEGAY M., PEYRON JP, RIOU-NIVERT P. (sous presse). L'adaptation des forêts françaises au changement climatique : entre certitudes et incertitudes. World Forestry Congress 2009. Buenos Aires, Argentina.

LENOIR J., GEGOUT JC, MARQUET PA, DE RUFFRAY P., BRISSE H. (2008). A significant upward shift in plant species optimum elevation during the 20<sup>th</sup> century. Science, vol 320, 27 June 2008, pp 1768-1771.

LHONORE J., BOUGET C. (2003). Les invasions d'insectes. Pour la science, n°310 – Août 2003, pp 40-43.

LOUSTAU D. (coordinateur) (2004). Séquestration de Carbone dans les grands écosystèmes forestiers en France. Quantification, spatialisation, vulnérabilité et impacts de différents scénarios climatiques et sylvicoles. Rapport final du projet CARBOFOR, Programme GICC 2001 "Gestion des impacts du changement climatique", Convention Gip ECOFOR n° 3/2001. INRA, IFN, CIRAD, Météo France, Université d'Orléans, Université Paris-Sud 11, CNRS, ENGREF, LSCE. 138 p.

MARCAIS B., DESPREZ-LOUSTAU ML (2007). Le réchauffement climatique a-t-il un impact sur les maladies forestières ? Rendez-Vous Techniques de l'Office National des Forêts, hors série n°3. pp 47-52.

Mission Interministérielle de l'Effet de Serre (MIES) (2004). Plan climat 2004 – Face au changement climatique agissons ensemble. Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable, MIES, 88 p.

MOISSELIN JM, SCHNEIDER M, CANELLAS C., MESTRE O. (2002). Les changements climatiques en France au XX<sup>ème</sup> siècle, Etude des longues séries homogénéisées de données de température et de précipitations. La météorologie n°38, pp 45-56.

MOISSELIN JM, DUBUISSON B. (2006). Evolution des valeurs extrêmes de température et de précipitations au cours du XX<sup>e</sup> siècle en France. La météorologie n°54, pp 33-42.

MORTIER F., BARTET JH (2004). Crisis management in natural environments must take on board the lessons learned from the 1999 storms. Revue Forestière Française, n°4 2004.

NAGELEISEN LM (2008). Actualités sur les dépérissements du « chêne ». Bilan de la santé des forêts en 2006. Département de la santé des Forêts (DSF), février 2008, 7 p.

Observatoire national des effets du réchauffement climatique (ONERC) (2003). Conséquences du réchauffement climatique sur les risques liés aux événements météorologiques extrêmes : sur la base des dernières connaissances scientifiques quelle action locale ? Actes du colloque « Les élus face au changement climatique », juin 2003, Paris. 70 p.

Office National des Forêts (ONF) (2001). Pour une stratégie de reconstitution durable, Reconstitution des forêts après tempête, Guide.

Office National des Forêts (ONF), 2009. L'adaptation de la gestion forestière face au changement climatique : premières orientations. Office National des Forêts, Paris, Instruction n°09-T-66, mars 2009, 5p.

PIERMONT L. (2007). Climate change - The adjustment of silvicultural practices undertaken by the Société Forestière de la Caisse des Dépôts. Revue Forestière Française, Vol. 59, N° 2, pp 129-135.

PEYRON JL (2007). Impacts of climate change and adaptation measures in forestry: from France to Europe. Nizhniy Novgorod. EU – Russian Federation Conference on Climate Change.

PLANTON S. (2004). Changements climatiques futurs en France. In: Changements climatiques, quel impact en France ?. Paris, Greenpeace. 139 p.

PRUDENT-RICHARD G., GILLET M., VENGEON JM, DESCOTES-GENON S. (2008). Changements climatiques dans les Alpes : impacts et risques naturels. Projet Interreg III B Alpine space, rapport technique n°1 de l'ONERC. 87 p.

PUECH J. (2009). Mise en valeur de la forêt française et développement de la filière bois. 74 p.

RIOU-NIVERT P. (2008). Changements climatiques : les interrogations des sylviculteurs. Dossier « Changement climatique : questions des sylviculteurs et réponses des chercheurs ». Forêt-Entreprise n°180, mai 2008, pp 14-29.

ROBERT N. (2008). Which forest management, wood production and use could reduce greenhouse gases emissions? Presentation at conference "The European Forest-Based Sector: Bio-Responses to Address New Climate and Energy Challenges?", 6-8 November 2008, Nancy, France.

ROMAN-AMAT B. (2007). Préparer les forêts françaises au changement climatique. Rapport à MM les Ministres de l'Agriculture de la Pêche et de l'Ecologie, du Développement et l'Aménagement Durables, 125 p.

ROUAULT G., CANDAU JN, LIEUTIER F., NAGELEISEN LM, MARTIN JC, WARZE N. (2006). Effects of drought and heat on forest insect populations in relation to the 2003 drought in Western Europe. *Ann. For. Sci.* 63, pp 613-624.

SEGUIN B. (2007). L'agriculture en Europe sous un climat plus chaud. Pour la science, dossier n°54, janvier-mars 2007, 4 p.

THUILLER W. (2007). Climate change and the ecologist. *Nature*, vol. 448, August 2007. pp 550-552.

UNFCCC (2007). National greenhouse gas inventory data for the period 1990-2005. Bali, Note du Secretariat. FCCC/SBI/2007/30, 28 p.

VALLET P. (2005). Impact de différentes stratégies sylvicoles sur la fonction « puits de carbone » des peuplements forestiers. Modélisation et simulation à l'échelle de la parcelle. ENGREF. 208 p.

VALLET P., CHEVALIER H., GINISTY C. (2008). Availability of wood energy from the French forestry industry. Presentation at conference "The European Forest-Based Sector: Bio-Responses to Address New Climate and Energy Challenges?", 6-8 November 2008, Nancy, France.

VENNETIER M. (2005). Impact du changement climatique sur les forêts de la Sainte Baume. CEMAGREF.

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

# Annexe 1

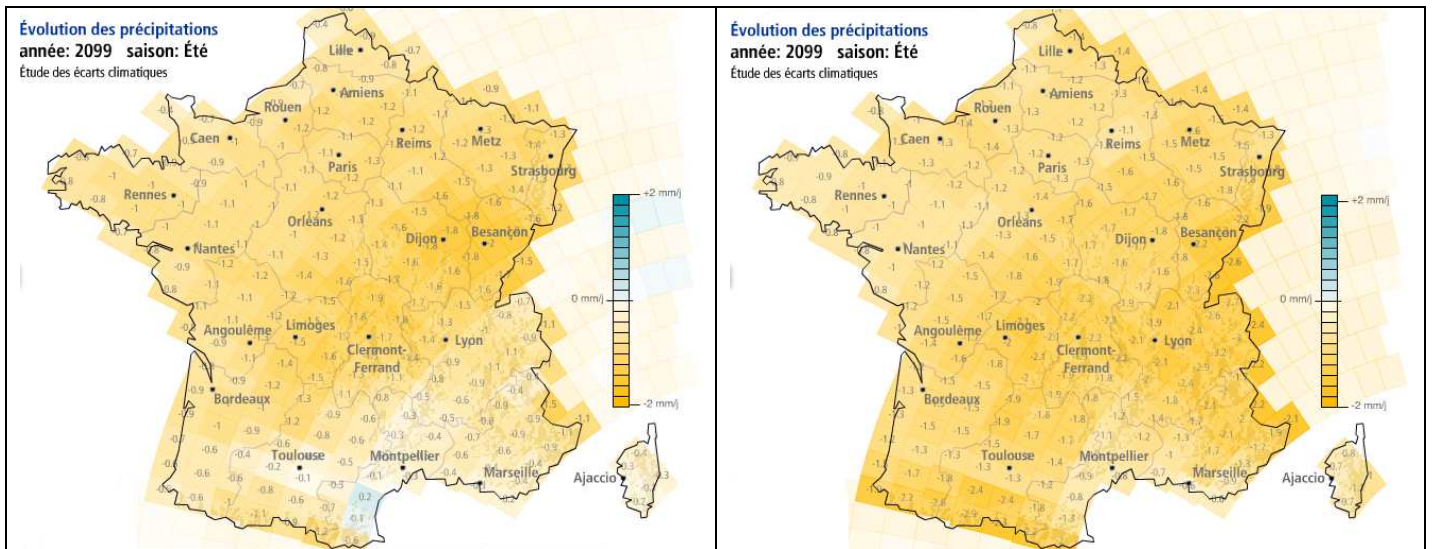


Figure 1 : Evolution estimée de la pluviométrie estivale (en mm/jour) entre le climat actuel et celui de la fin du 21<sup>ème</sup> siècle selon le scénario B2 (à gauche) et le scénario A2 (à droite). Source : [http://climat.meteofrance.com/chgt\\_climat/simulateur/](http://climat.meteofrance.com/chgt_climat/simulateur/).

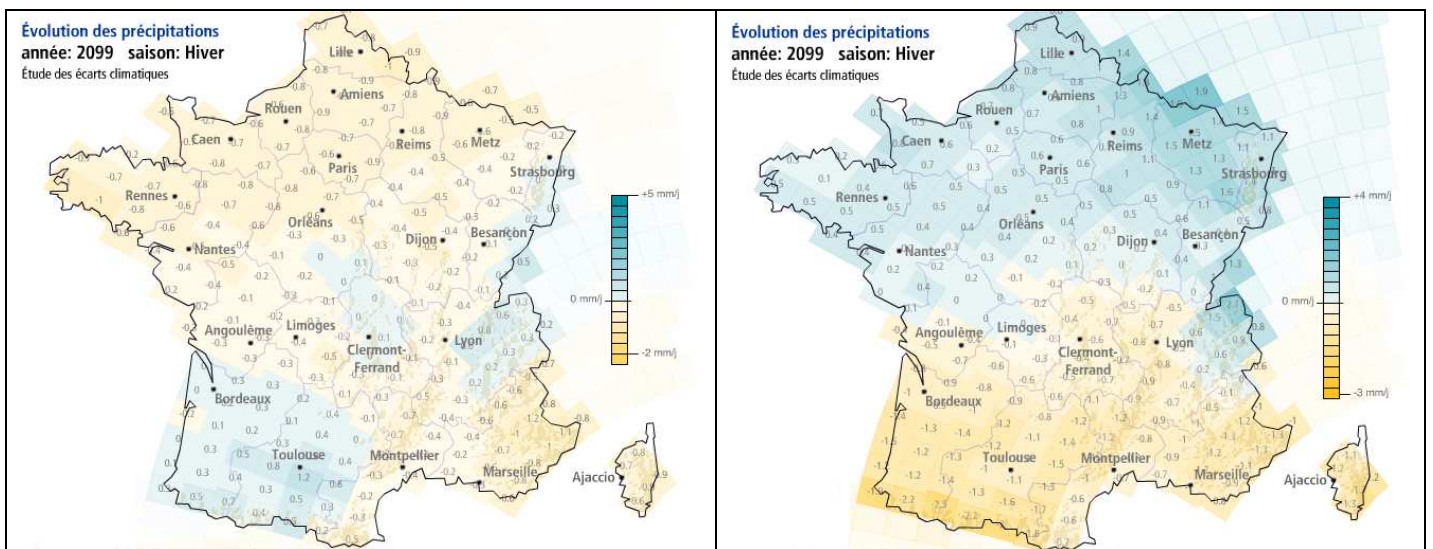


Figure 2 : Evolution estimée de la pluviométrie hivernale (en mm/jour) entre le climat actuel et celui de la fin du 21<sup>ème</sup> siècle selon le scénario B2 (à gauche) et le scénario A2 (à droite). Source : [http://climat.meteofrance.com/chgt\\_climat/simulateur/](http://climat.meteofrance.com/chgt_climat/simulateur/).

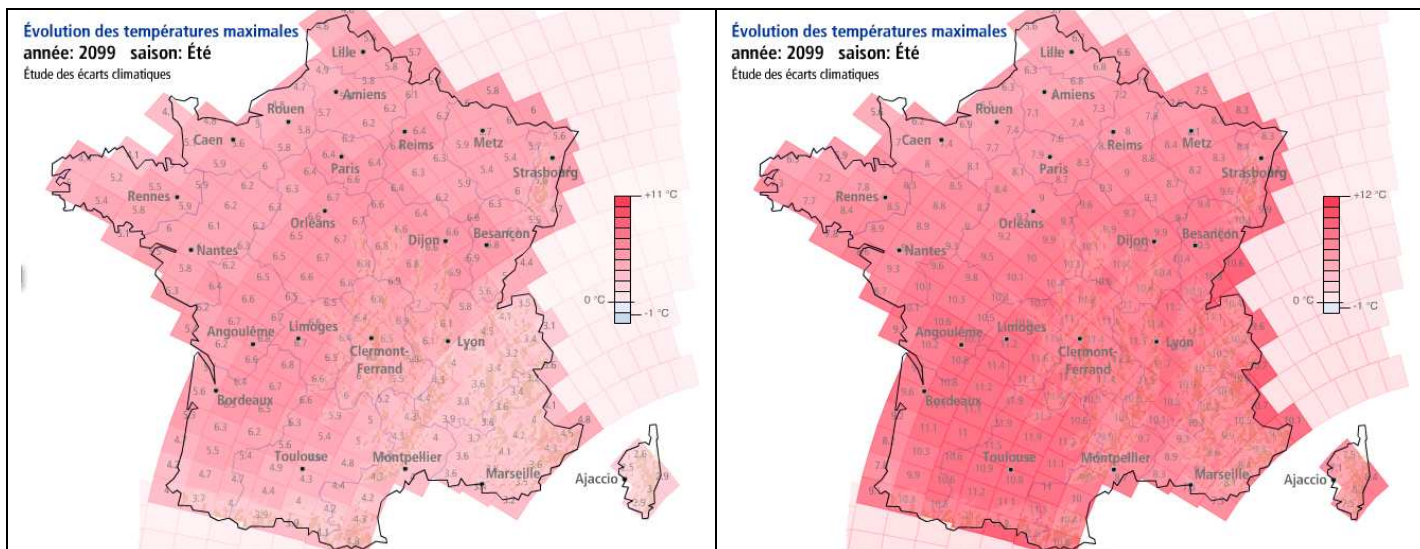


Figure 3 : Evolutions estimées des températures maximales d'été (en °C) entre le climat actuel et celui de la fin du 21<sup>ème</sup> siècle selon le scénario B2 (à gauche) et le scénario A2 (à droite).  
Source : [http://climat.meteofrance.com/chgt\\_climat/simulateur/](http://climat.meteofrance.com/chgt_climat/simulateur/).

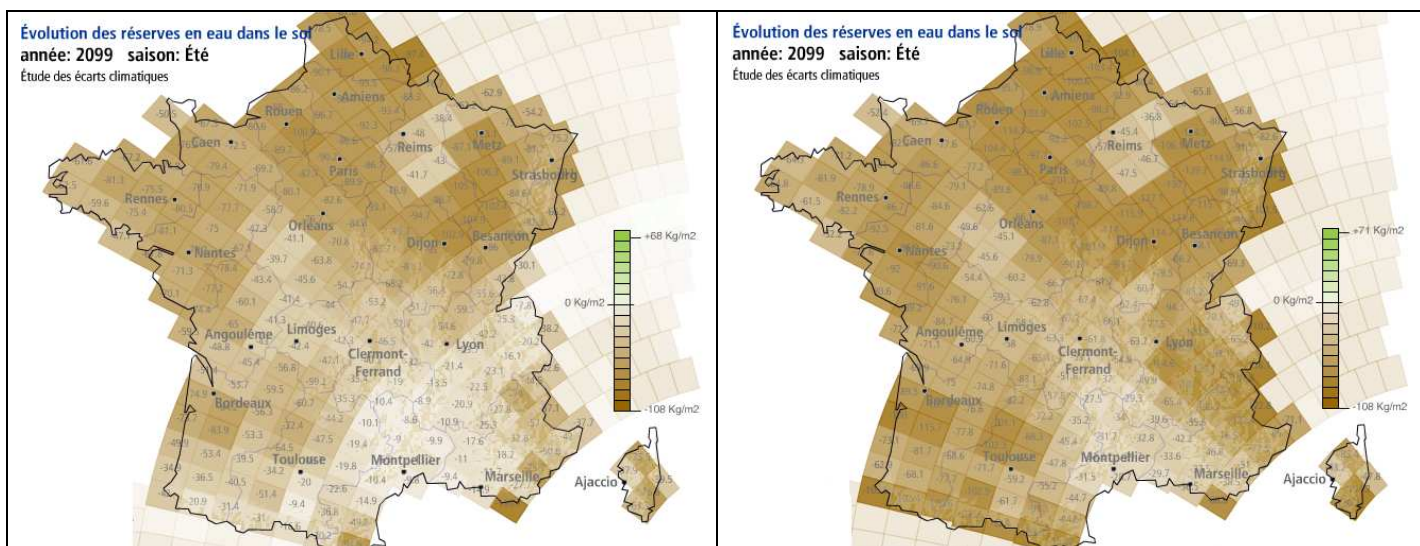


Figure 4 : Evolutions estimées des réserves en eau du sol en été (en kg/m<sup>2</sup>) entre le climat actuel et celui de la fin du 21<sup>ème</sup> siècle selon le scénario B2 (à gauche) et le scénario A2 (à droite).  
Source : [http://climat.meteofrance.com/chgt\\_climat/simulateur/](http://climat.meteofrance.com/chgt_climat/simulateur/).