

LE CHANGEMENT CLIMATIQUE ET LA FORÊT MÉTROPOLITAINE FRANÇAISE

GÉRARD BELTRANDO*

Les signes du changement climatique semblent de plus en plus nombreux et les écosystèmes en place, ainsi que les activités humaines qui en dépendent, s'y adaptent au mieux de leur possibilité. La forêt - dont le fonctionnement et la productivité sont étroitement dépendants du climat - est particulièrement concernée et, mis à part les effets des événements de fréquence rare (tempêtes de décembre 1999, canicule et sécheresse de l'été 2003...), son taux de croissance s'est accru depuis près d'un demi-siècle et en particulier depuis les années 1980. Mais cette augmentation a des limites qui pourront être atteintes rapidement et pas uniquement sous l'effet du changement climatique. Comment le changement climatique va-t-il se répercuter sur la forêt métropolitaine française ? Quel scénario de changement climatique faudrait-il prendre en compte ? Quels conseils peuvent être connus aux forestiers qui doivent gérer et planter des arbres qui seront exploités par les générations futures ?

Mots-clés : changement climatique, forêt française, incertitude, modèle climatique

Introduction

Le fonctionnement et la productivité de la forêt montre une dépendance étroite au climat et, mis à part les effets des événements de fréquence rare (tempêtes de décembre 1999, canicule et sécheresse de l'été 1976 et 2003...), sa productivité moyenne s'est accrue depuis près d'un demi-siècle. Le possible changement climatique annoncé – qu'il soit d'origine naturelle (activité solaire) ou qu'il résulte des activités humaines (rejets de gaz à effet de serre) – pourra affecter ces milieux qui produisent des biens et des services multiples aux sociétés humaines (fonction sociale et récréative, fonction économique de production de matériaux, fonction de protection de la biodiversité...). L'utilité de la forêt est d'autant plus importante qu'elle permet aussi de réduire l'exposition aux événements climatiques extrêmes, en limitant la force des vents près de la surface, en favorisant la recharge des nappes phréatiques, ou encore en réduisant la température de l'air en période de canicule.

* Professeur, Univ. Paris-Diderot – Sorbonne Paris Cité ; UMR 8586 du CNRS (PRODIG),
5 rue Watt (C.C. 7001) 75205 Paris Cedex 13 ; beltrando@univ-paris-diderot.fr

Malgré les incertitudes sur la simulation numérique du climat futur et au-delà de querelles actuelles, qui ne sont pas évoquées ici, sur la véracité et sur l'origine, naturelle ou humaine, du changement climatique, il est donc fortement utile d'essayer d'anticiper au mieux quelles conséquences pourrait avoir un changement climatique. Cela permettrait de gérer au mieux les écosystèmes forestiers pour minimiser le plus possible leurs impacts néfastes. L'observation, la vigilance et l'anticipation sont et seront d'autant plus nécessaires que, d'après les modèles prédisant le climat du futur, ce changement climatique pourrait intervertir dans un laps de temps inférieur à une génération pour la plupart des espèces d'arbres. Les possibilités d'adaptation génétique des peuplements en place seraient donc réduites et les conséquences économiques, sociales ou écologiques perturberaient alors nos sociétés modernes devenues très vulnérables.

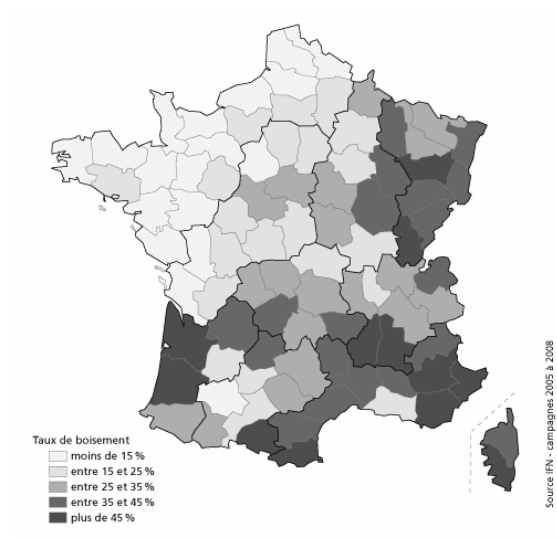
1. Dynamique et évolution de la forêt et du climat depuis un siècle

Dans un contexte de changement climatique annoncé, une attention particulière doit être portée à la forêt française relativement diversifiée, compte tenu du croisement des influences climatiques et de la nature des sols du pays et ce, d'autant plus que cette forêt en évolution constante est fortement modelé par l'homme qui en fait un usage variable au fil des décennies.

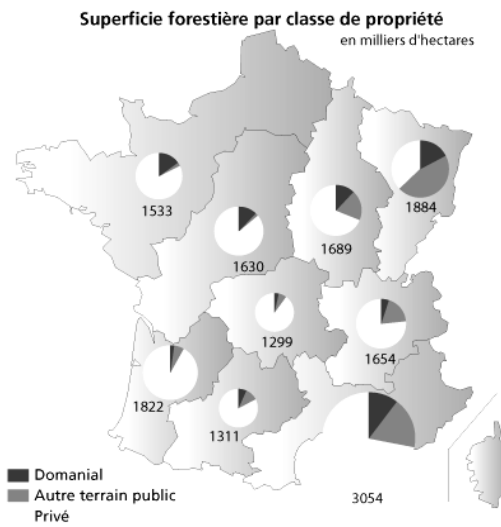
1.1. La forêt métropolitaine aujourd'hui : type de propriété et diversité des essences

Passant de 9 millions d'ha au milieu du XIX^e siècle (période d'extension maximale de la population rurale) à 11 millions d'ha en 1950 (début de la modernisation et de la déprise rurale), la France – troisième pays européen pour la surface forestière après la Suède et la Finlande – possède actuellement 10 % des forêts européennes, soit 155 000 km² (Inventaire Forestier National, IFN, 2008) du territoire métropolitain. Cela représente un taux moyen de boisement de 28 %, mais le pays présente de grandes disparités régionales : le taux varie de 5% dans la Manche à 63 % dans les Landes (*fig. 1a*).

Les surfaces boisées ont augmenté de 1,7 millions d'ha dans les dernières décennies, dont 1,4 million en forêt privée, grâce notamment à l'extension sur friches et aux boisements de terres agricoles.



a)



b)

Fig. 1. La forêt française aujourd'hui. a) Taux de boisement par département (valeur en %) ;
b) superficie forestière par classe de propriété en France (métropole et Corse) (en milliers d'hectares)
(Source : Inventaire Forestier National, IFN, 2008)

Ce sont les régions de l'arc méditerranéen et de la Corse qui ont enregistré la plus forte croissance alors que la progression a été faible, voire nulle ou négative, dans l'arc atlantique de l'Aquitaine, au Nord de la France, ainsi que dans le Centre-Est et la Lorraine (Cinotti, 1996). Mais, selon l'enquête Teruti sur l'utilisation du territoire (site web : Agreste, Chiffres et données, n° 208), depuis 2008, la forêt cesse de gagner du terrain en France, après une progression continue pendant plus de 150 ans. Ces dernières années, c'est l'artificialisation des sols qui absorbe de plus en plus les terres agricoles abandonnées.

En métropole, la forêt privée est de loin la plus importante avec un peu plus de 10 millions d'ha, soit presque 3/4 de la surface forestière (3,5 millions de propriétaires possèdent en moyenne 2,6 ha, dont 2,6 millions ont moins de 1 ha). C'est dans le Sud et dans l'Ouest du pays que la forêt privée occupe les proportions les plus importantes (*fig. 1b*).

Les forêts domaniales qui couvrent environ 10 % de la surface forestière, ont souvent des origines anciennes (forêts royales ou du clergé, anciens domaines de chasse, héritage des saisis lors de la Révolution) et plus rarement des origines plus récentes, comme les forêts de guerre plantées sur les zones les plus meurtries par la première Guerre Mondiale (15 600 ha dans les seules forêts de la Meuse, nord-est de la France). Les forêts restantes sont la propriété des collectivités territoriales (communes, départements ou régions). La quasi-totalité de ces forêts publiques est gérée par l'Office National des Forêts (ONF, environ 10 000 salariés en 2007, dont 6 600 sous statut public et 3 300 bûcherons et ouvriers forestiers de droit privé). Un quart de la forêt domaniale pousse au-dessus de 1 000 m d'altitude (% supérieur à la moyenne nationale) sur des sols plutôt pauvres et sur des pentes plus difficiles à exploiter, ce qui pose un problème de coût de gestion et ce coût pourrait s'amplifier dans un contexte de changement climatique rapide.

En termes de volume sur pied, les feuillus représentent environ 63 % du total, avec comme essences principales : 3 variétés de chêne [le rouvre (12%), le pédonculé (11%) et le pubescent (4%)], ainsi que du hêtre (11%), du châtaignier (5%) et du charme (4%). Les principales essences de résineux (37 % du total) sont : l'épicéa commun (8%), le pin maritime (7%), le sapin pectiné (7%) et le pin sylvestre (6%). Cette relative diversité, compte tenu de la tranche latitudinale du pays s'explique par sa position à l'intersection des influences climatique : méditerranéenne, continentale et océanique (*fig. 2*) et par le fait que la forêt couvre divers types de sols et occupe toutes les altitudes, depuis le niveau de la mer jusqu'à la limite supérieure à laquelle l'arbre peut pousser. Mais bien évidemment, à l'intérieur de ces « régions climatiques », la répartition des espèces forestières est sous la dépendance de facteurs naturels, édaphiques et topographiques incluant aussi des aspects climatiques, mais aussi des contraintes de gestion forestière pour les plantations.

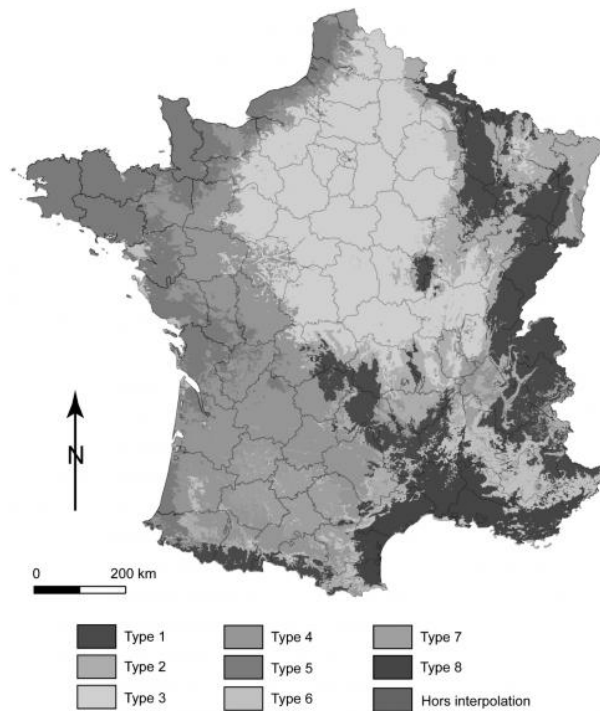


Fig. 2. Typologie climatique du territoire français en 8 classes (Joly *et al.*, 2010)

Types : 1 : climats de montagne ; 2 : climat semi-continentale et climat des marges montagnardes ; 3 : climat océanique dégradé des plaines du Centre et du Nord ; 4 : climat océanique altéré ; 5 : climat océanique franc ; 6 : climat méditerranéen altéré ; 7 : climat du Bassin du Sud-Ouest ; 8 : climat méditerranéen franc (source : <http://cybergeog.revues.org/index23155.html#tocfrom3n2>)

Cette relative diversité – en terme d'essence, de mode de gestion, de rôle économique, social et écologique de la forêt – est un facteur essentiel à intégrer pour envisager de préparer les écosystèmes forestiers à un climat qui pourrait évoluer plus rapidement que durant les derniers siècles que ce soit naturellement ou sous l'action des gaz à effet de serre rejetés par l'Homme.

1.2. Les contraintes thermique et hydrique des espèces arbustives

Aux latitudes de la France, la présence de la forêt est limitée pour l'essentiel par le froid et la disponibilité en eau. Schématiquement pour les espèces naturelles, on peut distinguer au centre de leur aire une zone correspondant à l'optimum climatique pour la croissance et la reproduction. Aux marges de cette aire, le développement et la croissance de l'espèce sont progressivement limités, soit par le froid, soit par le manque d'eau. D'autres facteurs climatiques tels la neige ou le vent, interviennent aussi dans l'explication de la répartition des essences. Si ponctuellement ils peuvent jouer un rôle majeur, à l'échelle de vastes régions leur action est manifestement moins importante.

En hiver, pendant la période de repos, les plantes sont résistantes aux basses températures grâce à une faible activité biologique. Durant cette saison, une exposition plus ou moins longue, selon les espèces, à des températures relativement froides est nécessaire pour permettre la « lever la dormance » des bourgeons au printemps : un manque de froid peut conduire à une anomalie de développement de ces bourgeons (Chouard, 1951). Ensuite, vient la période de débourrement qui constitue une composante essentielle de l'adaptation des arbres au climat sous les climats tempérés et boréaux. Chuine et Cour (1999) ont étudié les effets, en conditions naturelles, des températures de l'été précédant la dormance et des températures froides automnales et hivernales sur le débourrement de quatre essences européennes sous climat méditerranéen (*Platanus acerifolia*, *Castanea sativa*, *Quercus pubescens* et *Vitis vinifera*). Les auteurs concluent que les températures estivales de la saison précédente n'ont aucune influence sur le débourrement, qui est principalement déterminé par les conditions thermiques depuis la sortie d'endormance hivernale jusqu'au débourrement, et, dans une moindre mesure, par les températures froides qui précèdent cette période. Un débourrement trop précoce a fréquemment pour conséquence des dégâts de gelées qui peuvent dans certaines situations compromettre le développement et la croissance des espèces. Pour plusieurs espèces d'arbres (ainsi que de plantes) des régions tempérées, le débourrement a pu être mis en relation avec la somme des degrés jours précédant ce stade phénologique et ce risque de gelées dommageables ne se rencontre pas uniquement dans les zones les plus froides. Il peut aussi concerner des zones à climats plus doux, par exemple le bassin méditerranéen lorsque les nuits sont claires (gel de type radiatif). La topographie, en canalisant les masses d'air froid, intervient aussi dans l'explication de la répartition des températures minimales (Beltrando, 1998). Le gel dommageable du printemps affecte certaines espèces. En 2003, après des périodes relativement douces au mois de mars favorisant un débourrement précoce, deux épisodes de gels tardifs sont intervenus successivement mi-avril et mi-mai et ont endommagé la végétation forestière. Au mois d'avril la période de gel a duré de 6 à 7 jours, pendant lesquels les températures minimales ont varié de - 4 à - 8 °C en plaine suivant les régions. Ce gel a particulièrement concerné la Champagne, la Bourgogne ainsi que le Nord-Est

du pays. Le risque de gelées dommageables de printemps (après le débourrement) est souvent plus marqué dans les vallées et les bas de versant lorsque le temps est stable (Beltrando, 1998). Comme dans les terroirs agricoles, ce gel n'apparaît pas uniquement dans les régions les plus froides, mais également dans les régions à climats plus doux, de type méditerranéen ou océanique, où le démarrage de la végétation est généralement plus précoce, et il peut occasionner des dégâts importants.

La sécheresse, en combinaison avec divers facteurs aggravants, comme les fortes températures et le vent, constitue l'autre facteur majeur pour la vie des végétaux en général, et des arbres en particulier. Les épisodes secs de longue durée qui jalonnent l'histoire climatique de l'Europe de l'Ouest (1911, 1921, 1976, 1984, 2003...), peuvent entraîner comme dans d'autres régions du monde tempérées, le dépérissement et finalement la mort des arbres, surtout de ceux qui sont déjà affaiblis pour d'autres raisons (champignons, insectes...).

Aussenac (1978) constate que dans tous les épisodes durablement secs, les effets sont rapides, l'année même ou l'année suivante, et qu'ils concernent plus particulièrement :

- certaines espèces exotiques (*Picea sitchensis*, *Larix leptolepis*, *Douglas taxifolia*...) ou des essences indigènes installées en dehors de leur optimum de développement) ;
- les jeunes plants ou semis de différentes essences exotiques ou indigènes;
- à des degrés divers, toutes les essences dans les stations à sol superficiel ou à réserve hydrique faible (sol sableux ou caillouteux).

Legay *et al.* (2008) montrent que seulement une partie des peuplements de chêne pédonculé, pur ou en mélange (environ un million d'hectares en France, d'après l'IFN 2005), correspond à ses exigences de très bonne nutrition minérale et d'alimentation en eau régulière. Les auteurs précisent que bien souvent, notamment dans l'Ouest du pays et le Bassin Parisien, il occupe des stations à hydromorphie temporaire où l'arbre souffre des sécheresses estivales, éventuellement aggravées par les excès d'eau printaniers asphyxiants, et l'inadaptation de ces peuplements ne pourra que s'accroître sous l'effet d'un changement climatique.

Une augmentation du nombre de jours « très chaud » et secs n'est pas sans conséquence sur la phénologie des arbres. Cela diminue l'activité photosynthétique des feuilles et peut aboutir à leur perte précoce. D'après les travaux de l'UMR « Physiologie intégrée de l'arbre fruitier et forestier » de INRA-Université Blaise Pascal (2005), lorsque l'arbre ne peut plus synthétiser et stocker suffisamment d'amidon il devient plus sensible au froid, en particulier aux gels précoces. Ce scénario, observé lors de la canicule de 2003, pourrait se renouveler dans le contexte du changement climatique puisque les MCG simulent des températures hivernales sensiblement moins froides qu'actuellement, ainsi que des déficits hydriques plus marqués surtout dans la

moitié sud du pays. Ainsi paradoxalement, le risque pour les arbres dans un climat futur plus chaud pourrait être le froid qui succède aux épisodes de sécheresse, car même dans un contexte hivernal moins froid, certaines essences seraient plus vulnérables qu'actuellement aux basses températures. A l'opposé, pour d'autres essences, le changement climatique pourrait avoir un aspect positif en retardant l'apparition des premières gelées qui constituent un facteur limitant pour certaines espèces résineuses et feuillues (cèdre, douglas ou peupliers) à période de croissance longue et tardive (Aussenac et Guehl, 2007).

La nature du sol se combine aussi aux effets du climat pour expliquer la répartition et le plus ou moins bon état de santé des plantations, comme l'illustre l'exemple suivant du chêne rouvre et du chêne pédonculé. Le Chêne rouvre (appelé aussi sessile, *Quercus petraea*), est une espèce très répandue dans les plaines et les collines française (sauf région méditerranéenne). Cette espèce est sensible au froid et aux gelées de printemps (fig. 3), mais elle est assez rustique et peut accepter une faible alimentation en eau estivale et une certaine pauvreté du sol. Le Chêne pédonculé (*Quercus robur*) demande des sols plus riches et bien alimentés en eau toute l'année. Il supporte l'excès d'eau temporaire et les sols argileux ou compacts, mais il donne des résultats décevants et de forts risques de dépérissements en période de sécheresses répétées.

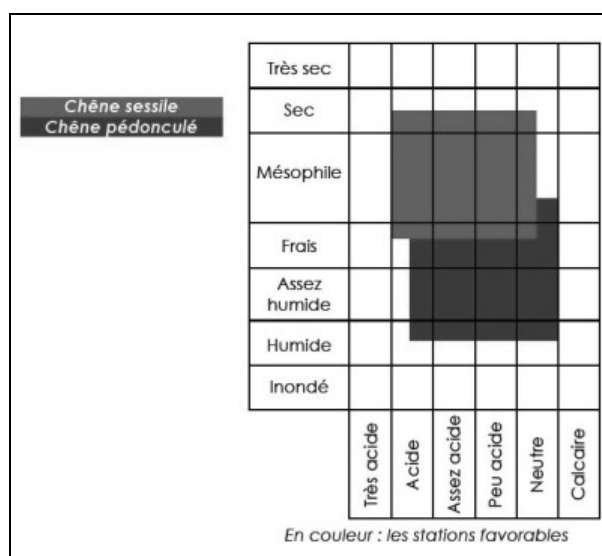


Fig. 3. Nature du sol et alimentation en eau estivale pour le chêne sessile et le chêne pédonculé (illustration du Centre National de la Propriété Forestière de Poitou-Charentes) (Source :

http://www.crpf-poitou-charentes.fr/IMG/cache-400x363/chene1_400_x_363_-400x363.jpg)

Enfin, les variables du climat et leurs excès plus ou moins importants règlent pour une grande part la répartition des essences forestières qui évoluent au fil des siècles. Les gestionnaires tentent d'anticiper au mieux les conséquences de ces extrêmes du climat pour réduire le dépérissement de certaines espèces, mais dans un contexte de possible changement climatique, les adaptations pourront devenir plus complexes et il sera probablement plus difficile d'imaginer les anticipations possibles.

1.3. Le constat d'une évolution du climat depuis un siècle en France

Avant toute chose, il est utile de rappeler que le climat est naturellement variable comme en témoigne l'irrégularité des saisons d'une année sur l'autre et cette remarque vaut aussi pour des échelles de temps de l'ordre d'une à quelques décennies (Oscillation Nord Atlantique), du siècle (Optimum Médiéval, Petit Age Glaciaire) ainsi que pour les échelles paléoclimatiques. Cette variabilité est tout à fait normale, elle s'explique par les fluctuations des courants océaniques, du rayonnement solaire ou par d'autres composantes du système climatique (par exemple l'activité volcanique qui injecte des aérosols dans l'atmosphère et modifie les bilans de rayonnement solaire et terrestre...). De même, il est tout à fait normal de voir, de temps en temps, des événements hydro-climatiques ou météorologiques extrêmes (fortes précipitations à l'origine d'inondations, sécheresses, grêle, tempête...), qui sont à l'origine de dégâts matériels et des pertes humaines parfois considérables. Ces événements, trop souvent qualifiés « *d'exceptionnels* », sont à l'origine de dégâts matériels et humains majeurs qui ont beaucoup augmenté durant les dernières décennies, parce que les sociétés sont plus vulnérables que dans le passé. Mais cela n'est pas dû à une amplification des phénomènes météorologiques et climatiques.

Cependant, depuis un siècle et demi, l'utilisation des combustibles fossiles et secondairement la déforestation sous les basses latitudes sont responsables d'une augmentation d'environ un tiers de la concentration en gaz carbonique (CO₂). Ce carbone injecté dans l'atmosphère, joue un rôle essentiel dans ce que l'on appelle « l'effet de serre additionnel ». Si une partie est absorbée par les océans et la biosphère continentale, le reste s'accumule dans l'atmosphère. C'est cette modification de la composition de l'air sous l'action des activités humaines qui modifie l'équilibre énergétique de la planète (*fig. 4*).

Depuis quelques décennies, un certain nombre d'indicateurs montrent qu'à l'échelle de la moyenne du globe, le climat évolue (réchauffement superficiel des océans, fonte de la banquise, bilan de masse négatif des inlandsis et de la plupart des glaciers de montagne...).

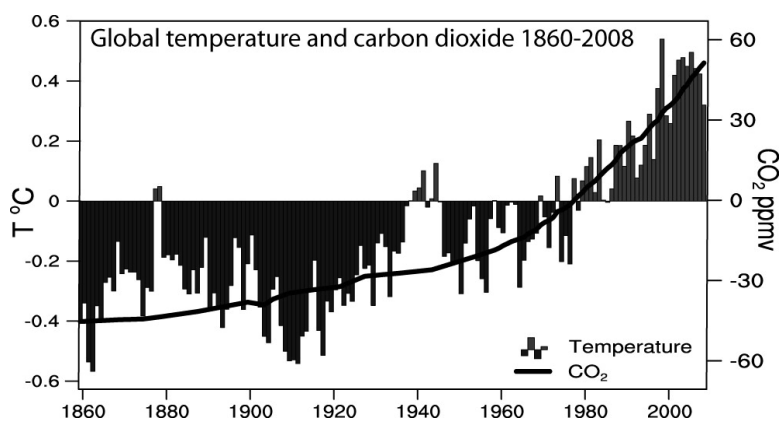


Fig. 4. Température (en °C) et taux de CO₂ (en partie par million de volume, ppmv) entre 1860 et 2008 (d'après Trenberth 2009, site du Carbon Dioxide Information Analysis Centre)

Pour le cas de la forêt, cela apparaît par exemple dans les travaux de Myneni *et al.* (1997) portant sur l'analyse de données satellites de 1981 à 1991, au nord de 45°N, et qui montre une avance d'environ 8 jours pour le début de la saison de croissance active, ainsi qu'une prolongation d'environ 4 jours de la sénescence (allongement de la saison de croissance active de 12 jours environ). Il y a donc manifestement depuis quelques décennies, de nombreux indicateurs de changements dans les milieux physiques et la majorité des scientifiques pense que cela est lié à l'augmentation de la concentration en Gaz à Effet de Serre (GES). Même si une partie de cette tendance s'explique aussi par d'autres facteurs encore mal compris par la science, cela doit interpeller nos sociétés modernes qui sont massivement émettrices de GES. La rapidité des changements pourrait être telle qu'elle entraînerait des bouleversements dans les écosystèmes et dans les agrosystèmes, ce qui occasionnerait un coût d'adaptation pour les sociétés.

En France, l'augmentation de la température moyenne au cours du XX^{ème} siècle a été de l'ordre de 0.9°C (Moisselin *et al.*, 2002), mais avec une nette accélération sur la dernière décennie de ce siècle et sur la première du XXI^{ème}. La variabilité des températures présente des signes d'augmentation plus importants sur les températures minimales (0.7 à 1.7°C /siècle) que sur les maximales (0 à 1.3°C) ce qui se traduit donc au final par une augmentation des valeurs moyennes (*fig. 5*). L'augmentation plus importante apparaît à l'ouest du pays, elle semble due à une modification de la nébulosité nocturne différenciée selon la distance aux côtes atlantiques. Pour illustrer cette évolution, on indique souvent que le réchauffement des températures moyennes intervenu durant le XX^{ème} siècle correspond à un déplacement du climat vers le Nord de 180 km environ.

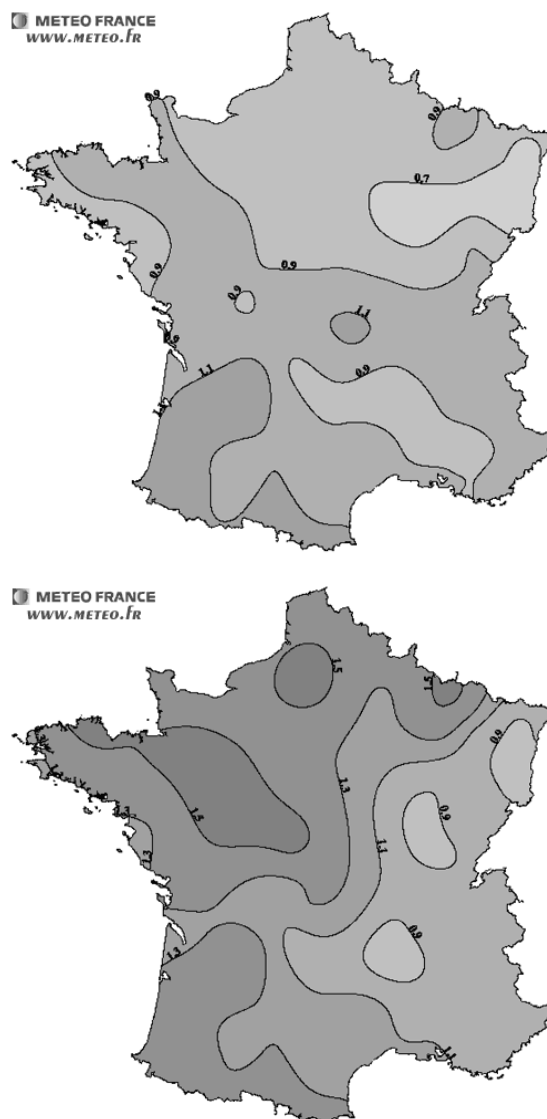


Fig. 5. Augmentation (en °C) des températures moyennes (en haut) et minimales (en bas) observées sur la période 1901-2000 (Météo-France) (disponible à <http://www.meteo-bordeaux.fr/rech/rcf/z03.gif>)

Sur la même période, l'évolution des précipitations a été plus contrastée. Elle montre une légère tendance à l'augmentation sur les deux tiers nord du territoire, avec des contrastes saisonniers plus marqués : en hausse en hiver et en

baisse en été ; c'est durant cette dernière saison que les sécheresses ont tendance à être plus fréquentes.

Ces changements observés se traduisent dans les forêts de la métropole par un allongement de la période de croissance, avec une avancée de la date de débourrement des bourgeons et un retard de la chute des feuilles (Lebourgeois *et al.* 2001) L'augmentation des températures, mais aussi celle des taux de CO₂ et la présence d'azote dans les pluies, expliquent certainement en partie cette tendance qui demande probablement à être précisée par de nouvelles études agronomiques. Car dans ce changement il est difficile de faire la part des différentes modifications de l'environnement. Les événements de fréquence rare, tels que la tempête de 1999 et les sécheresses de 2003, puis de 2005-2006, ont aussi laissés des traces bien visibles sur les jeunes plantations. Il se pourrait aussi que les dépérissements touchant certains peuplements, tels les sapins dans des massifs du sud de la France (Vésubie, Ventoux, Aude), aient un lien avec un changement climatique (mais la pollution de l'air liée au trafic automobile en pleine croissance est peut-être aussi un facteur explicatif).

Les changements climatiques observés en France sont cohérents avec d'autres changements tels l'augmentation de la température de la surface de la mer, la réduction de la couverture neigeuse, le raccourcissement des saisons de gel, le retrait des glaciers ou la diminution de la glace de mer. Des évolutions nettes sont déjà observées dans de nombreux écosystèmes (des changements phénologiques sont parmi les premiers impacts visibles de cette évolution du climat), mais il est très difficile de faire la part entre les différentes modifications de l'environnement.

2. La simulation du changement climatique : les résultats des modèles et leur marge d'incertitude

Pour évaluer le climat à la surface de la planète pour les prochaines décennies les chercheurs élaborent et utilisent des modèles numériques représentant les diverses composantes du système climatique. En modifiant certains paramètres, comme par exemple la concentration atmosphérique en CO₂, cela permet d'évaluer ce que pourrait devenir le climat du futur.

2.1. *L'effet de serre et la modélisation du climat futur (aperçu)*

Lorsque le rayonnement solaire traverse l'atmosphère (essentiellement sous la forme d'un rayonnement de courtes longueurs d'ondes), une partie atteint la surface de la planète, le reste est réfléchi vers l'espace ou est absorbé par l'atmosphère. En retour la planète (surface et atmosphère) émet un rayonnement thermique (essentiellement sous la forme de rayons infrarouges) qui, à la différence du rayonnement courte longueur d'onde, est beaucoup plus fortement absorbé par les GES. Cela réchauffe l'atmosphère, qui se refroidit à son tour en émettant à son tour un rayonnement également sous forme de grande longueur d'onde et l'essentiel de ce rayonnement se dirige vers la surface de la terre : c'est ce que l'on appelle l'effet de serre. Ce phénomène s'explique donc par le fait que, le CO₂ et d'autres gaz de l'atmosphère à structure au moins triatomiques (H₂O, CH₄, N₂O, CFC...) sont presque entièrement « perméables » à la lumière visible (courte longueur d'onde), alors que ces gaz absorbent très fortement les rayonnements infrarouges (grande longueur). L'effet de serre est donc un phénomène naturel dû à la présence des GES contenus dans l'atmosphère, et il est lié aux températures moyennes de l'air à la surface de la planète. Sans ce phénomène la vie sur terre n'aurait pu exister sous la forme que nous connaissons.

Depuis un peu plus de 150 ans, l'utilisation des combustibles fossiles est largement responsable de l'augmentation d'environ un tiers de la concentration en gaz carbonique (CO₂) qui joue un rôle majeur dans ce que l'on appelle « *l'effet de serre additionnel* ». Ce gaz n'est pas le seul en cause : la teneur en méthane (CH₄) a plus que doublé, sur la même période, essentiellement à cause du développement de l'agriculture (fermentation anaérobie des ruminants, riziculture inondée...) et une bonne part de l'accroissement d'environ 15 % de la teneur en protoxyde d'azote (N₂O) s'explique par la combustion des combustibles fossiles, ainsi que par la fertilisation azotée des sols (GIEC, 2007).

Pour estimer l'évolution possible du climat sous l'effet de l'augmentation des GES, les physiciens de l'atmosphère et les climatologues utilisent des Modèles de Circulation Générale (MCG, appelés aussi GCM suivant l'abréviation anglophone) permettant de simuler « au mieux » le fonctionnement de l'atmosphère et l'évolution possible des paramètres du climat en fonction de divers scénarios d'évolution sociale et économique de la population mondiale qui emmètra les GES additionnels dans le futur. Dans ce travail, il sera fait allusion, suivant les exemples présentés, aux scénarios d'évolution les plus couramment utilisés par le *Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat* (GIEC, connu aussi sous l'abréviation anglophone de « IPCC »). Soit du plus optimiste vers le plus pessimiste, en terme de rejets de GES pour le XXI^{ème} siècle, les scénarii

suivants : B1 (+ 1,8°C de différence moyenne entre la fin du XX et la fin du XXI^{ème} siècle), B2 (+ 2,4°C), A1B (+ 2,8°C), A2 (+ 3,4°C)] (IPCC, 2007).

Un MCG est un outil numérique qui résout les équations primitives de la mécanique et de la thermodynamique des fluides géophysiques, dans l'espace (3 D) ainsi que dans le temps. Cet outil permet d'obtenir une traduction numérique du paramétrage des principaux processus (physiques, géophysiques, chimiques et biologiques) qui régissent le système climatique. Malgré la rigueur apportée par les scientifiques pour représenter avec le plus de réalisme possible l'énorme complexité de la physique atmosphérique, aucun modèle ne peut simuler avec précision le comportement futur de l'atmosphère qui est complexe et insuffisamment connu. Les modélisateurs en sont conscients et les données climatiques du futur (« *les projections* ») qui sont produites, pour des mailles de quelques centaines de km de côté et en fonction de plusieurs scénarii d'émissions anthropiques de GES et d'aérosols, doivent être interprétées avec un minimum de prudence (Beltrando, 2010).

Depuis une dizaine d'années, les modèles ont évolués, certaines interactions internes au système climatique sont mieux paramétrées et les modèles permettent d'accéder à des résolutions spatiales plus fines. Les mailles de ces modèles permettent d'envisager les conséquences du changement à des échelles spatiales plus opérationnelles ; ce sont les Modèles de Circulation Régionale (MCR) qui commencent à intéresser les scientifiques afin d'apporter des éléments de réponses à la société sur le futur du climat et sur ses répercussions sociales, écologiques et économiques.

2.2. Une tendance à l'augmentation des températures et à une différenciation nord-sud des bilans hydriques

D'après les MCG, durant le XXI^{ème} siècle, le changement climatique se traduira par un changement des cumuls saisonniers des précipitations et de l'évapotranspiration potentielle. De façon globale, les différents modèles prédisent une augmentation des précipitations sous les hautes latitudes et dans la zone intertropicale et une diminution en zone méditerranéenne. Ils divergent sur la limite entre zones d'augmentation et zone de diminution de la pluviométrie qui, pour certains modèles, passe par le Centre-Nord de la France et pour d'autres dans le Midi... Ces résultats doivent être interprétés avec précautions, car les prévisions des modèles climatologiques sont beaucoup plus imprécises pour la pluviométrie que pour la température (Kittel et *al.*, 1998). Pour la contrainte hydrique future, un minimum de prudence s'impose, car la marge d'incertitude des MCG est encore trop importante pour ce facteur.

En revanche, pour les températures qui jouent un rôle déterminant sur le cycle phénologique, des précisions peuvent être apportées sur les probabilités

d'apparition des valeurs thermiques quotidiennes simulées par les modèles pour des mailles d'une taille d'environ 50 km de côté. Pour l'essentiel, d'après les résultats de cette modélisation et pour deux scénarios assez différents, A2 et B2 (fig. 6), on remarque qu'en été, le réchauffement serait marqué et qu'il y aurait une diminution des précipitations sur les régions méditerranéennes. Les sécheresses dans le sud du pays ainsi que dans les pays voisins (Espagne, Italie...) seraient donc accentuées.

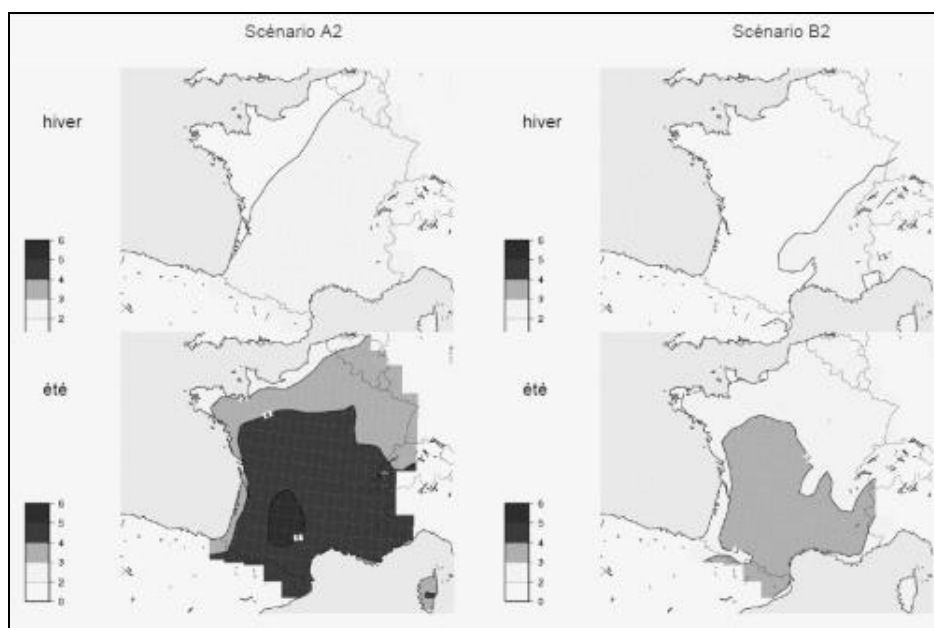


Fig. 6. Prévisions d'écart de température en France métropolitaine entre la fin du XXI^{ème} et la fin du XX^{ème} siècle, en été et en hiver, selon les scénarios A2 et B2 (© Météo-France, 2007) (disponible à <http://climat.meteofrance.com/content/2009/9/21104-43.png>)

Les simulations prévoient aussi une augmentation nette du nombre de canicules estivales en France. Les journées de très forte chaleur (température maximale supérieure à 35°C) devraient devenir beaucoup plus fréquentes à la fin du XXI^{ème} siècle. La fig. 7 montre les résultats fournis par le modèle ARPEGE-climat de Météo-France pour 3 scénarios d'émission de GES pour le XX^{ème} siècle B1 (optimiste), A1B (intermédiaire) et A2 (pessimiste), les moyennes de températures prévues varient autour de 14 à 16°C pour les années 2020-2040. Cet exemple montre aussi que ce n'est pas forcément pour le scénario pessimiste (A2), que le modèle simule forcément les températures les plus élevées (ex. en 2038, c'est ce scénario qui donne les plus basses). Ce résultat, *a priori* détonnant, est compréhensible, il montre d'une part, qu'une

sortie de modèle ne donne qu'une probabilité par rapport à une période donnée de quelques années (ici la moyenne thermique relativement basse de 2038 indique simplement qu'une telle valeur est simulée par le modèle vers les années 2030 ce qui traduit la variabilité naturelle du climat) ; d'autre part, que la variabilité climatique n'est pas un phénomène linéaire et que dans un contexte de réchauffement il ne faut pas exclure des années moins chaudes (et peut-être même une augmentation de la variabilité interannuelle). En revanche, pour les dernières décennies du XXI^{ème} siècle, c'est bien le modèle A2 qui donne les valeurs les plus éloignées des années actuelles avec des écarts qui seraient, dans ce cas de figure, de plus de 4°C par rapport aux dernières décennies du XX^{ème} siècle qui ont déjà été chaudes.

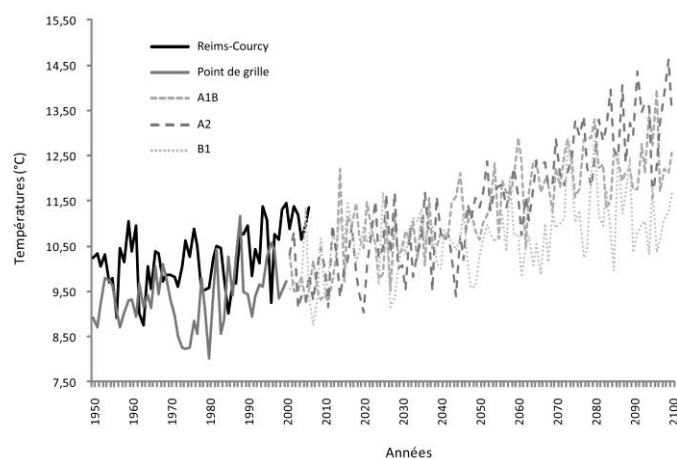


Fig. 7. Températures moyennes annuelles d'avril à septembre pour la station Reims-Courcy en Champagne (en gris sur la période 1950-2006), pour un point de grille ARPEGE-Climat (Retic) couvrant la région de la Montagne de Reims (en noir sur la période de contrôle, 1950-2000), puis pour les scénarios de simulations A1B, A2 et B1 (couleur 2001-2100) (Beltrando et Briche, 2010)

Les résultats présentés, issues du modèle ARPEGE-Climat (Retic) de Météo-France confirment ceux d'autres modèles ils montrent que la croissance quasi certaine du taux atmosphérique de CO₂ et celle probable des températures ainsi que l'augmentation probable de la variabilité interannuelle et de la fréquence des événements extrêmes estivaux auront des conséquences multiples et parfois inattendues sur les écosystèmes forestiers, comme par exemple l'évolution contrastée suivant les essences des stades phénologique.

3. Impacts d'un changement climatique sur la forêt

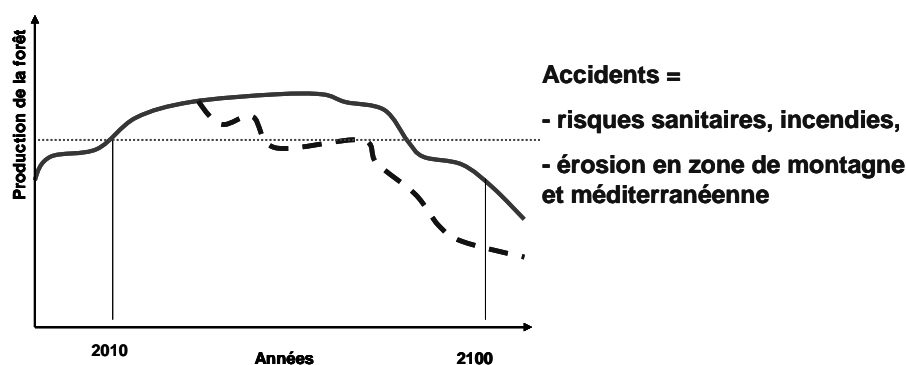
La forêt est un lieu d'échange d'énergie, d'eau, de chaleur et de composés chimiques. Elle est donc un élément important de la machine climatique. Il est connu depuis longtemps que le CO₂ (la fertilisation carbonique) a une influence sur la physiologie des arbres. Ceux-ci le transforment par photosynthèse en carbone organique et, associé à une augmentation de la température et de la durée de la période de croissance, cela semble expliquer par exemple que les épicéas et les hêtres du Nord de la France grandissent aujourd'hui nettement plus vite qu'au XIX^{ème} siècle (Picard *et al.*, 1999). L'augmentation de la concentration en CO₂ résultant de l'activité humaine peut donc être profitable aux forêts si l'arbre est en bonne santé et si ces autres besoins sont disponibles. Cela est confirmé par des études dendro-écologiques montrant que la croissance radiale des arbres a augmenté depuis une centaine d'années. Même si toutes les causes expliquant la croissance ne semblent pas encore suffisamment comprises et notamment celles qui pourrait expliquer qu'au delà d'un certain seuil climatique, la productivité pourra baisser.

3.1. *Les tendances moyennes envisageables pour la croissance des peuplements*

En tenant compte des résultats de la modélisation numérique du changement climatique, il est envisageable de simuler la proportion d'essences qui pourrait changer et donc d'imaginer la physionomie des forêts. Même si cet exercice est largement discutable car, à nouveau, la modélisation est inévitablement simplificatrice, elle apporte des éléments de réflexion permettant de s'interroger sur l'avenir des paysages que nous avons connus jusqu'à présent et qui dans quelques décennies pourraient changer de manière relativement rapide. Si des effets bénéfiques seront possibles dans certaines régions – notamment sous la forme d'une augmentation de la croissance des arbres – lorsque les sols et l'humidité le permettront, des effets néfastes sont aussi à envisager (dépérissements, migration vers le nord d'insectes ravageurs...). La situation pourra aussi être bien différente d'une région à l'autre.

Les MCG prévoient une tendance à l'augmentation des températures et montrent aussi qu'il pourrait y avoir une augmentation de la variabilité et que les phénomènes extrêmes (froids, chauds, pluvieux) pourraient devenir plus fréquents. Lorsque la disponibilité en eau et en azote est suffisante, une tendance à l'augmentation de la température là où elle est un facteur limitant principal (en particulier dans le Nord-Est et en montagne), la stimulation de la photosynthèse, par un plus fort taux de CO₂, facilitera la croissance des peuplements. Mais les MCG prévoient une augmentation de la contrainte

hydrique qui s'installera d'abord dans le Sud-ouest puis qui pourra progresser en direction du nord et de l'est. Ainsi, Guiot (2007, cité par Roman-Amat, 2007) indique que le Pin d'Alep en zone méditerranéenne, pourrait perdre une production de bois estimée à 1 de 2,5 à 5,75 m³/ha/an sous l'effet d'une aggravation de la sécheresse. Au final, la tendance à long terme serait celle d'une réduction de la production globale de bois de la forêt française (fig. 8) : « en l'absence d'accident (sécheresse exceptionnelle, incendies...) cette réduction n'interviendrait que dans plusieurs décennies, et progressivement; des accidents pourraient l'accélérer notablement. » (Roman-Amat, 2007).



Trait plein : hypothèse d'évolution progressive

pointillés: hypothèse « d'accidents » exemple vers 2030-2040

Fig. 8. Schéma théorique d'évolution de la productivité d'une forêt. Trait plein : hypothèse d'évolution progressive ; tiretés : hypothèse d'«accidents» aux environs de 2023 et 2048 (Roman-Amat, 2007)

Si la plupart des chercheurs s'accordent pour prédire un déplacement des aires de répartition potentielle des espèces, vers des zones aujourd'hui plus froides, les modalités de ces déplacements sont encore très mal connues. Comment s'opérera la disparition des végétaux sur les marges où la variabilité interannuelle sera plus grande (zone de transition) ? A quelle vitesse ? Pendant cette phase de migration, les espèces seront plus fragiles aux attaques de pathogènes et peut-être aussi aux dépôts de particules atmosphériques, mais cela est très difficile à prendre en compte aujourd'hui.

3.2. Simulation de l'aire potentielle des essences forestières d'ici à 2100

Depuis une dizaine d'années, des recherches ont été entreprises pour modéliser les relations entre les essences ligneuses et le climat, afin d'estimer

comment ces distributions pourraient être modifiées en réponse à différents scénarios climatiques (Huntley *et al.*, 2004). En France, les travaux de Badeau *et al.* (2005), présentent l'intérêt d'être réalisés à une échelle spatiale relativement fine, car ils utilisent les données collectées dans le cadre de l'Inventaire Forestier National (IFN) sur la répartition de essences ligneuses (relevées sur 104 259 points de sondage de l'IFN entre 1985 et 2001, soit 1 point de relevé pour environ 130 ha de forêt). Treize groupes d'espèces présentant des aires de répartition semblables ont été définis par des méthodes d'analyses statistiques et les données ont été croisées, d'une part avec des données climatiques (température, nombre de jours de gel, pluviométrie, rayonnement...) en point de grille de 1km de résolution (méthode AUREHLY de Bénichou et Le Breton, 1987) ; d'autre part avec la carte des sols au 1/100 000° (cette étude pionnière a été réalisée sans intégrer le rôle de l'homme, ce qui constitue une limite majeure à sa validation). L'objectif étant de rechercher les aires potentielles pour chacune des essences prises en compte en tenant compte des contraintes climatiques. L'atlas produit pouvant aussi apporter une aide aux forestiers pour le choix à venir des meilleures essences de reboisements...

La *fig. 9* montre deux exemples de résultats obtenus, l'un pour le chêne vert, l'autre pour le hêtre en appliquant une élévation de 2,5°C à la fin du siècle.

Le chêne vert (*Quercus ilex L.*), espèce emblématique de la région méditerranéenne est surtout présent dans les zones de fortes chaleurs et de fort ensoleillement estival (*fig. 9a*). Son extension est par ailleurs limitée par les fortes amplitudes thermiques annuelles et par un trop grand nombre de jours de gel. Dans l'hypothèse d'une élévation de + 2,5°C, son extension pourrait dépasser la latitude de la Loire (*fig. 9b*). Et comme l'indique les auteurs de l'étude, cet exemple du chêne vert peut être transposé à la majorité des espèces méditerranéennes : l'olivier, le pin d'Alep, le pin parasol, le cyprès toujours vert etc.

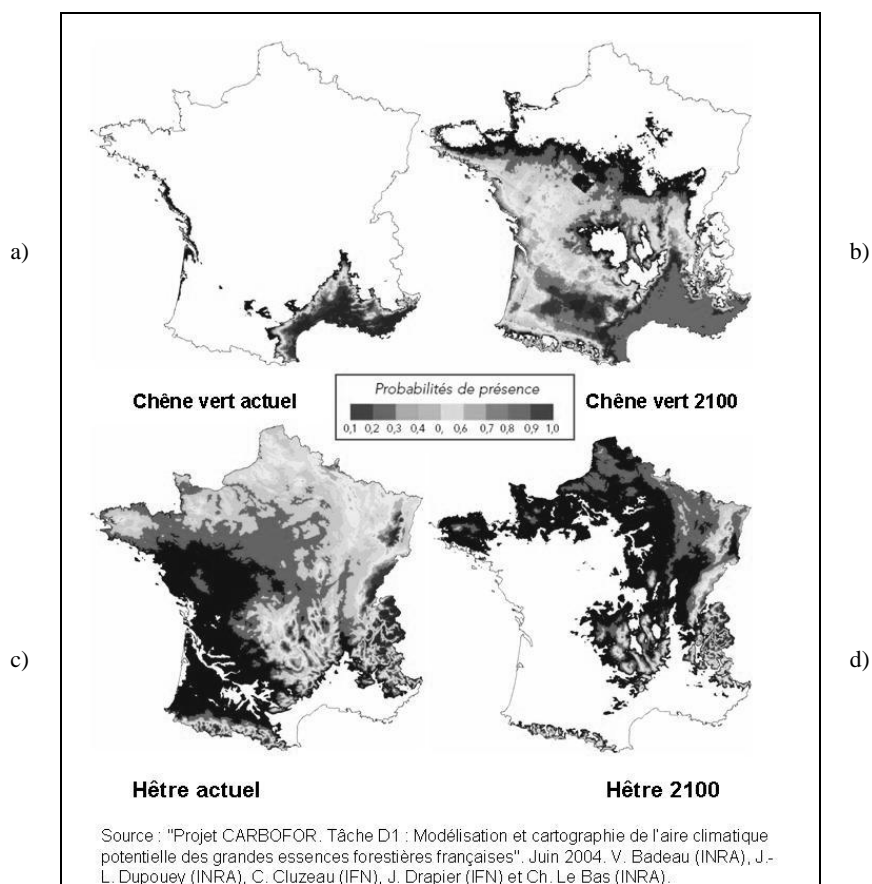


Fig. 9. Niche climatique du chêne vert actuel (a) et à la fin du XXI^{ème} siècle (b) ; du hêtre actuel (c) et à la fin du XXI^{ème} siècle (d) (document projet CARBOFOR, 2004)

N.B. : La couleur grise indique une zone où les paramètres climatiques futurs sont au-delà de la gamme actuelle

(http://www.inra.fr/les_partenariats/collaborations_et_partenaires/entreprises/en_direct_des_labos/quelles_forets_en_france_en_2100)

Le hêtre commun (*Fagus sylvatica L.*) est une essence de plaine dans le nord de son aire et plutôt de montagne vers le sud. En France, il est présent à peu près partout lorsque les précipitations sont supérieures à 700 mm (fig. 9c). Avec une hypothèse de plus fortes températures en été et d'une baisse des précipitations son aire pourrait régresser fortement et disparaître d'un grand quart sud-ouest du pays (fig. 9d). Le même phénomène pourrait être observé pour les espèces montagnardes : mélèze, sapin, épicéa,...

3.3. *Quelques spécificités des régions de montagne et des régions méditerranéennes*

Au final, malgré les limites évoquées sur les résultats produits par les modèles climatiques, quelques spécificités régionales sont mises en évidence par les différentes sorties de modèles. En particulier, deux grands types de régions climatiques, dans lesquelles les impacts sur les paysages devraient être importants, attirent plus particulièrement l'attention :

– Dans les zones montagneuses, le changement climatique tel qu'il est simulé par les MCR se traduira par des premières neiges plus tardives et une réduction de la durée d'enneigement. Compte tenu du gradient thermique altitudinal moyen, pour chaque degré d'augmentation des températures moyennes, la limite inférieure de la neige devrait remonter d'approximativement 150 m en altitude. Aux altitudes où l'enneigement deviendra faible ou nul, l'érosion torrentielle pourrait croître, notamment en début et en fin de saison froide. En limitant la rétention d'eau solide en saison froide (neige), cela aura des conséquences sur le chargement des nappes ainsi que sur la gestion des barrages hydroélectriques et sur l'alimentation en eau de certaines villes et contrebas des massifs montagneux.

– Dans la région méditerranéenne, on pourrait s'attendre à une élévation de la température estivale ainsi qu'à une diminution des précipitations printanières plus importantes que dans le reste du pays. Cela aurait bien évidemment des conséquences majeures sur les incendies de forêt qui sont très largement d'origine criminelle et dont l'extension spatiale s'explique en partie par le manque de gestion de ces espaces sensibles. De plus, la fréquence de périodes sèches ainsi que l'occurrence des fortes pluies pourraient s'accroître, ce qui ne manquerait pas d'avoir des conséquences en termes de sensibilité à l'érosion des sols. L'augmentation du risque d'incendie pourrait conduire à une proportion plus élevée de sol fréquemment remis à nu, et donc à un accroissement du taux d'érosion, surtout sur les terrains en pente qui sont fréquents dans cette région. Mais les incendies de forêts sont majoritairement dus aux actions de malveillance et les dommages sont d'autant plus importants que l'habitat récent se diffuse largement dans l'espace (mitage), que souvent les parcelles à proximité des habitations ne sont pas débroussaillées.

Cela ne veut pas dire qu'il faille oublier les autres espaces forestiers. Dans les régions où l'eau permettra la croissance des arbres, sous l'effet du CO₂, de la température..., le stockage du CO₂ par la forêt finira par atteindre des limites et le développement forestier va accroître la compétition entre les arbres, et donc augmenter la mortalité. Par exemple, dans les plantations où les troncs sont très proches les uns des autres, les arbres pousseront plus haut et seront mécaniquement plus fragiles face aux tempêtes.

Ces quelques résultats demandent bien évidemment à être confirmés par d'autres études et par une meilleure prise en compte des spécificités aux échelles locales. De nombreuses questions restent encore sans réponses suffisamment précises : les réserves organiques des sols vont-elles augmenter ou diminuer ? A quelle vitesse ? Certains sols passeront-ils des seuils minimaux critiques pour leur stabilité physique ? Les sols vont-ils se comporter comme puits ou source supplémentaire de carbone ? Quel sera en retour l'effet sur la composition de l'atmosphère ? Si toutes les forêts du territoire national pourraient être affectées par les conséquences d'un possible changement climatique, certaines régions cumuleront manifestement les handicaps et devront focaliser plus particulièrement l'attention des décideurs afin de réduire les conséquences négatives du changement climatique.

Discussion et conclusion: un avenir difficile à préciser

Les conséquences d'un possible changement climatique sur la forêt sont encore source d'interrogations, que ce soit sur les tendances du climat futur, sur la réponse des écosystèmes à ce nouveau climat ou encore sur la capacité de l'Homme à prendre des mesures préventives qui, d'après les économistes, devraient coûter moins cher que des mesures curatives.

Plusieurs actions volontaires des hommes permettront certainement de réduire les conséquences négatives. Ainsi, un mélange de plusieurs essences a plus de chances de se maintenir, car ces essences n'ont pas toutes les mêmes exigences en ce qui concerne le climat moyen et sa variabilité. Si certaines sont moins sensibles ou mieux adaptées que d'autres, elles pourront assurer la permanence du couvert forestier. De même, les peuplements comportant des arbres de tous les âges devraient, *a priori*, être plus flexibles que ceux constitués d'une seule classe d'âge. Il sera en effet plus facile dans ces peuplements d'ajuster les récoltes en fonction de l'évolution du climat et de favoriser la plantation des essences qui résistent le mieux au climat connu dans la région concernée. D'autres techniques de conduite pourraient aussi être utilisées, comme par exemple une diminution de la densité des arbres pour limiter la consommation en eau dans les zones où ce facteur est déjà limitant.

Mais les conséquences pour la forêt d'un changement climatique pourront aussi être positives dans un certain nombre de cas. Si les sols le permettent et lorsque l'eau sera suffisante, l'augmentation de la température donnera probablement à certaines espèces (cèdre, peuplier...) la possibilité de se développer dans des régions où elles sont pour l'instant mal adaptées. D'une manière générale, l'accroissement du taux de CO₂ et de la température moyenne permettra l'augmentation de la croissance et donc de la production, lorsque les sols et la disponibilité en eau le permettra comme par exemple dans le nord du pays.

Aujourd'hui, la priorité est à l'intensification de la recherche fondamentale et appliquée afin de mieux cerner, d'une part, les interactions entre des phénomènes telles l'augmentation du gaz carbonique, la température, ou la fertilité du sol ; d'autre part, le fonctionnement hydrique et carboné des couverts forestiers actuels et dans un contexte de changement climatique.

Remarque de l'auteur

Ce texte correspond au prolongement du résumé étendu (6 pages) publié dans les actes du XXIV^e colloque de l'Association International de Climatologie « *Climat montagnard et risques* », Rovereto (Italie), 6-10 septembre 2011.

BIBLIOGRAPHIE

- AUSSENAC, G., 1978, « La sécheresse de 1976 : Influence des déficits hydriques sur la croissance des arbres forestiers », *Rev. for. Fr.*, vol. **XXX** (2), 103-104.
- AUSSENAC, G. et GUEHL, J.-M., 1994, « Dépérissement et accidents climatiques », *Rev. for. Fr.*, vol. **XLVI** (5), 458-470.
- AUSSENAC, G. et GUEHL, J.-M., 2007, *Impacts sur la forêt et la sylviculture*, 7 p., disponible à http://www.museum.agropolis.fr/pages/savoirs/ecosysteme_mediterraneen/aussenac_gueh11999.pdf
- BADEAU, V., DUPOUEY, J.-L., CLUZEAU, C., DRAPIER, J., 2007, « Aires potentielles de répartition des essences forestières d'ici 2100 », *Rendez-vous techniques de l'ONF, Forêts et milieux naturels face aux changements climatiques*, Hors-série, n° 3, 62-66.
- BASTIEN, Y., AUSSENAC, G. et FROCHOT, H., 2000, « Les changements climatiques : conséquences pour la sylviculture », *Rev. for. Fr.*, vol. **LII**, 129-137.
- BELTRANDO, G., 1998, « Les gelées printanières en Champagne viticole : Quelques résultats obtenus à partir d'un nouveau réseau de stations automatiques », *La Météorologie*, **21**, 30-43.
- BELTRANDO, G., 2010, « Les géographes – climatologues français et le changement climatique aux échelles régionales », *Echo Géo* [En ligne], sur le vif 2010, mis en ligne le 12 avril 2010, URL : <http://echogeo.revues.org/11816>
- BELTRANDO, G. et BRICHE E., 2010, « Changement climatique et viticulture en Champagne : du constat actuel aux prévisions du modèle ARPEGE-Climat sur l'évolution des températures pour le XXI^e siècle », *Echo Géo* [En ligne], 14: <http://echogeo.revues.org/12216>
- BENICHOU et LE BRETON, 1987, « Prise en compte de la topographie pour la cartographie des champs pluviométriques statistiques », *La Météorologie*, **19**, 23-34.
- CHOUARD, P., 1951, « Dormances et inhibitions des graines et des bourgeons. Préparation au forçage. Thermopériodisme », *Cours du Conservatoire National des Arts et Métiers*, Centre de Documentation Universitaire, Paris, 84 p.
- CHUINE, I. et COUR, P., 1999, « Climatic Determinants of Budburst Seasonality in Four Temperate Zone Tree Species », *New Phytologist*, **143** (2), 339-349.
- CINOTTI, B., 1996, « Évolution des surfaces boisées en France : proposition de reconstitution depuis le début du XIX^e siècle », *Rev. for. Fr.*, vol. **XLVIII** (6), 547-562. URL : <http://echogeo.revues.org/11816>

- DEQUE, M., DREVETON, C., BRAUN, A. et CARIOLLE, D., 1994, "The ARPEGE-IFS Atmosphere Model: a Contribution to the French Community Climate Modelling", *Climate Dynamics*, **10**, 249-266.
- GIEC, 2007, *Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat*, équipe de rédaction principale Pachauri, R. K. et Reisinger, GIEC, Genève.
- JOLY, D. BROSSARD, TH., CARDOT, H., CAVAILHES, J., HILAL, M. et WAVRESKY, P., 2010, « Les types de climats en France, une construction spatiale », *Cybergeo: European Journal of Geography*, Cartographie, Imagerie, SIG, mis en ligne le 18 juin 2010, consulté le 27/07/2010. URL : <http://cybergeo.revues.org/index23155.html>
- LEBOURGEOIS, F., GRANIER, A., BREDA, N., 2001, « Une analyse des changements climatiques régionaux en France entre 1956 et 1997. Réflexions en termes de conséquences pour les écosystèmes forestiers », *Ann. for. Sci.* **58**, 733-754.
- LEGAY, M., MORTIER, F., 2006, « La forêt face au changement climatique : adapter la gestion forestière », *Coll. Les Dossiers Forestiers*, n° 16, ONF, Paris, 39 p.
- LEGAY, M., CORDONNIER, TH. et DHÔTE, J.-F., 2008, « Des forêts mélangées pour composer avec les changements climatiques », *Rev. for. Fr.*, **60**, n° 2, 181-190.
- KITTEL, T. G. F., GIORGI, F. et MEEHL, G. A., 1998, « Intercomparison of Regional Biases and Doubled-CO₂ Sensitivity of Coupled Atmosphere-Ocean General Circulation Model Experiments », *Clim. Dyn.*, **14**, 1-15.
- MYNENI, R. B., RAMAKRISHNA, R., NEMANI, R., et RUNNING, S., 1997, « Estimation of Global Leaf Area Index and Absorbed par Using Radiative Transfer Models », *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 35(6), 1380-1393; URL http://modis.gsfc.nasa.gov/EOS/SCITEAM/ARTICLES/MST_A0208.pdf
- MOISSELIN, J.-M., SCHNEIDER, M., CANELLAS, C. et MESTRE, O., 2002, « Les changements climatiques en France au XX^e siècle : étude des longues séries homogénéisées de température et de précipitations », *La Météorologie*, **38**, 45-56 ; URL : <http://www.smf.asso.fr/Ressources/Moisselin38.pdf>
- PICARD, J.-F., BECKER, M., NYS, C. et DUPOUEY, J.-L., 1999, « Evolution à moyen terme de la croissance radiale de l'épicéa et du hêtre en relation avec la fertilisation/amendement : analyse dendroécologique », *Rev. for. Fr.*, vol. **LI** (2), 197-218.
- ROMAN-AMAT, B., 2007, « Préparer les forêts françaises au changement climatique », *Rapport au Ministres de l'Agriculture et de la Pêche et au Ministre de l'Ecologie, du Développement et de l'Aménagement Durable*, 125 p. ; consulté le 3 août 2010 – URL http://agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/rapport-changt_climatbra.pdf

Site web (texte et données)

AGRESTE, Données en ligne sur les statistiques forestières :

<http://agreste.agriculture.gouv.fr/publications/chiffres-et-donnees/>

Revue forestière française : les articles des années 1949 à 2002 sont consultables en libre accès :

<http://documents.irevues.inist.fr/handle/2042/4752>