



HAL
open science

Contraintes climatiques sur les forêts

Denis Loustau, Alexandre Bosc

► **To cite this version:**

Denis Loustau, Alexandre Bosc. Contraintes climatiques sur les forêts. *Innovations Agronomiques*, 2012, 18, pp.71-86. hal-02641880

HAL Id: hal-02641880

<https://hal.inrae.fr/hal-02641880>

Submitted on 28 May 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

Contraintes climatiques sur les forêts

Loustau D., Bosc A.

INRA, UR1263 EPHYSE, 71 avenue Edouard Bourlax, 33140 Villenave d'Ornon.

Correspondance : denis.loustau@bordeaux.inra.fr

Résumé

A la lumière de données récentes, nous discutons des changements environnementaux futurs et présentons de façon simple et résumée les approches qui permettent de comprendre et prédire leurs impacts sur les services écosystémiques. Nous présentons une synthèse actualisée des pronostics apportés par la recherche sur les effets des changements environnementaux à venir sur le fonctionnement des forêts et discutons des implications pour la durabilité des services écosystémiques apportés par les forêts. Nous examinons les possibilités d'une adaptation des forêts au scénario de changement environnemental en cours et avançons que le maintien des services environnementaux aux niveaux local et global suppose d'abord le maintien voire l'extension des surfaces boisées et de leurs facultés de stockage et de substitution du carbone d'origine fossile. Compte tenu des possibilités d'adaptation des forêts et de leurs limites, une réduction drastique allant vers l'arrêt complet des émissions fossiles et de la modification anthropique du climat est donc la première des mesures de gestion durable qui doit être préconisée. Le rôle de la filière forêt-bois-énergie dans une telle politique serait majeur.

Mots-clés : Forêts, adaptation, changement climatique, services écosystémiques

Abstract

Based on recent evidence, we discuss future environmental changes and present a summary of the approaches developed to understand and precise their impact on ecosystem services. We present an updated synthesis of the predictions produced by researchers about the effects of foreseen environmental changes on forest functions and discuss about their implication for the sustainability of ecosystem services produced by forests. We examine the possibility that forests do adapt to the ongoing environmental changes, and hypothesise that maintaining environmental services at local and global first requires the maintenance and even the extension of forested areas with their ability to store carbon, and to substitute the use of carbon from fossil fuels. Given the known adaptability of forests and its limits, we believe that, to enable a sustainable management of forests, a priority measure to be taken would be a drastic reduction of emissions tending towards a full stop of the use of fossil carbon and of the anthropic impact on climate. The forest-wood-energy sector would play a major role in the development of such a policy.

Keywords: Forests, adaptation, climate change, ecosystem services

Introduction

Les forêts sont le terme final des successions végétales terrestres et représentent la formation la plus répandue sur les surfaces continentales. Ce succès adaptatif s'explique par la supériorité des arbres dans la compétition pour la lumière et l'évitement de la prédation par les herbivores. Les écosystèmes forestiers se caractérisent par leur extension verticale, aussi bien dans l'atmosphère que le sol, et par la

dominance des arbres. Cette extension impose une forme de vie pérenne, la croissance et le développement des arbres, tronc, branches, feuillage, s'étalant sur une durée de plusieurs années à plusieurs décennies.

Les biocénoses forestières sont à la fois acteurs et récepteurs des changements environnementaux. Elles y participent par leurs échanges avec l'environnement : atmosphère, eaux de surface et subsurface, sous-sol, formations limitrophes,... Inversement, les écosystèmes forestiers sont sensibles à ces changements. Ils y répondent par la mise en place de toute une chaîne de processus impliquant des réponses immédiates (ouverture stomatique, vitesse de croissance) et des ajustements à plus long terme (architecture et structure du couvert, mortalité). Ces processus présentent une forte plasticité phénotypique. Ils sont aussi génétiquement variables, héréditaires et donc susceptibles de conférer un avantage sélectif.

Le changement climatique est indissociable d'autres bouleversements environnementaux : décloisonnement géographique des écosystèmes, transport d'espèces exogènes, apports ou exportation à courte ou longue distance de matière (par pollutions ou par les récoltes), évolution du rayonnement (fraction direct/diffus), changement d'utilisation des terres et des pratiques sylvicoles. Les connaissances sur la sensibilité du fonctionnement des arbres et des écosystèmes forestiers à ces changements environnementaux ne sont pas complètes mais elles sont suffisantes pour pronostiquer un certain nombre d'impacts comme l'ont proposé plusieurs projets de recherche du programme Gestion et Impact du Changement Climatique et de l'Agence Nationale de la Recherche.

Nous discutons ici des changements environnementaux futurs à la lumière de données récentes et présentons une brève synthèse actualisée des pronostics apportés par la recherche sur les effets des changements environnementaux à venir sur le fonctionnement des forêts. Les implications pour la durabilité des services écosystémiques apportés à l'homme par les forêts sont présentées. Nous examinons les possibilités d'une adaptation des forêts au scénario de changement environnemental en cours et avançons que le maintien des services environnementaux aux niveaux local et global suppose d'abord le maintien voire l'extension des surfaces boisées et de leurs facultés de stockage et de substitution du carbone d'origine fossile. La réduction et l'arrêt de la modification anthropique du climat est donc la première des mesures de gestion durable qui doit être préconisée.

Fonctionnement et fonctionnalités des écosystèmes forestiers

Fonctionnellement, les forêts constituent les absorbeurs et les dissipateurs d'énergie les plus efficaces à la surface des continents (Holdaway *et al.*, 2010). Par leur extension verticale, elles constituent le principal compartiment de biomasse du cycle biogéochimique des éléments biogènes, le carbone notamment. Ces caractéristiques fonctionnelles permettent aux forêts de remplir plusieurs fonctions et services. Le principal est la récolte de bois pour différents usages : énergie, matériau de construction, fibres... et constitue l'objectif de gestion des forêts soumises. Viennent ensuite la production d'autres aménités (sociales, alimentaire, caoutchouc, oléagineux, protection de ressources naturelles,...). La Figure 1 donne la répartition en surface de des fonctions assignées aux forêts pour l'ensemble du globe inventoriées dans le dernier rapport sur es forêts du monde de la FAO.

A coté de ces fonctions de production et protection explicites, les forêts remplissent un certain nombre de fonctions ou services environnementaux non explicites. Fonctions de production et environnementales sont indissociables, elles résultent des processus d'échange de masse et d'énergie et du métabolisme des couverts et sont en fait deux aspects du fonctionnement biophysique biogéochimique des écosystèmes forestiers. L'impact des forêts sur l'environnement est considérable. Il implique toutes les échelles et niveaux d'organisation, depuis l'individu jusqu'à l'écosystème, du territoire à la région et du continent au niveau global. Il concerne le climat et l'atmosphère, le cycle de l'eau et des éléments, la biodiversité (non développée ici).

Fonctions désignées des forêts au niveau mondial, 2010 (%)

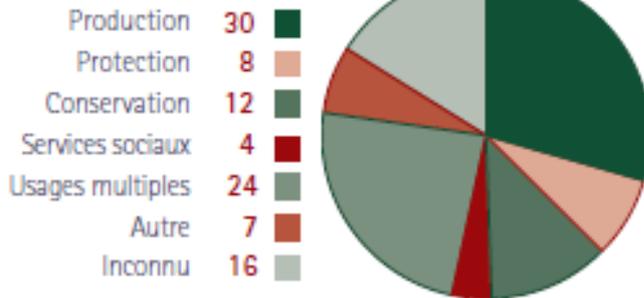


Figure 1 : Distribution géographique des affectations des forêts (FAO, FRA 2010).

Production de bois et d'énergie.

Elle constitue l'objectif premier de la gestion forestière et concerne essentiellement la biomasse ligneuse des arbres dont la moitié de la masse sèche est constituée de carbone. Cette production est extraite de forêts de production qui représentent une proportion relativement stable (30%) des forêts de la planète soit près de 1,2 milliard d'hectares auxquelles s'ajoutent 949 millions d'hectares (24%) destinés à des usages multiples, qui incluent entre autres la production de bois et de produits forestiers non ligneux.

Au niveau mondial, le volume du bois extrait recensé par les inventaires s'est élevé à 3,4 milliards de m³ par an, volume inchangé par rapport à celui communiqué pour 1990, soit 0,7% de la totalité du matériel sur pied. Le volume effectif du bois extrait incluant les récoltes non inventoriées est vraisemblablement plus élevé. La moitié environ du bois extrait était du bois de feu. Cette récolte alimente un stock de bois et carbone dans les produits forestiers sans doute inférieur à 1% du stock de biomasse sur pied.

Rôle hydrologique des forêts : quantité et qualité des eaux produites

Cette fonction des forêts est connue depuis Pline l'Ancien et comprise grâce aux développements des recherches en climatologie et hydrologie forestières du siècle dernier. L'interception des précipitations par la structure aérienne des couverts, l'extension en profondeur des sols forestiers et des racines des arbres ainsi que la rugosité des couverts et leur faible albedo confèrent aux écosystèmes forestiers une capacité de rétention et une faculté d'évaporation importantes, les plus élevées parmi les écosystèmes terrestres. Les forêts se présentent donc comme des réservoirs hydriques tampons à la surface des continents et sont douées de faculté de régulation des échanges. Elles atténuent l'intensité des pics de crue et minimisent au contraire l'intensité des sécheresses (Teuling *et al.*, 2010).

Rôle atmosphérique des forêts

L'impact climatique des forêts à l'échelle locale et régionale est aussi relativement bien documenté (Lee *et al.*, 2011 ; Bonan *et al.*, 1992). On peut le résumer en ce que les forêts entretiennent une ambiance plus humide et plus chaude que les autres types d'usage des terres, qu'elles atténuent aussi la turbulence de la couche limite atmosphérique. Les canopées forestières absorbent une quantité d'énergie maximale et la restituent au milieu pour moitié sous forme de flux de chaleur sensible, entretenant ainsi un climat local et régional plus chaud en moyenne qu'un milieu ouvert. Cet effet, confirmé par des observations récentes, est plus important aux latitudes élevées (Betts, 2000) mais devient nul voire même s'inverse sous 35° de latitude (Lee *et al.*, 2011). La seconde moitié de l'énergie absorbée est restituée à l'environnement sous forme d'un flux d'évaporation qui humidifie l'atmosphère.

Dans le cas des massifs forestiers de forte extension, ce flux de vapeur vers l'atmosphère génère la formation de nuages et le retour au sol de l'eau par des pluies convectives, contribuant ainsi à entretenir un cycle hydrologique « interne » (comme en Amazonie, Silva Dias *et al.*, 2002).

Cycle du carbone et des gaz à effet de serre :

Le rôle biogéochimique des forêts dans le cycle des éléments est majeur. Nous le détaillons ici dans le cas du carbone. Les forêts mondiales renferment 861.1 milliards de tonnes de carbone (GtC) dont 362.6 dans la biomasse, 72.6 dans le bois mort et 425.6 dans le sol et la litière et le sol (0-1m). Ce stock est légèrement supérieur au stock de carbone de la troposphère (environ 820 GtC) et était en augmentation nette de 1.2 ± 0.8 GtC par an sur la période 2000-2007. Cette augmentation résulte d'un accroissement moyen du stock des forêts en place de 2.5 GtC par an, (soit 26.4% des émissions d'origine humaine entre 2000 et 2007), contrebalancé par une perte nette par déforestation de 1.2 GtC par an (Pan *et al.*, 2011). En France, les sols forestiers (0-30 cm) représentent un stock estimé à 3.01 Gt (Martin *et al.* 2010) et la biomasse un peu plus de 1.0 Gt (Dupouey *et al.* 2010).

Changements climatiques et fonctionnement des forêts

Evolution globale

Le futur de ces émissions de CO₂ d'origine fossile dans l'atmosphère est hautement incertain mais rien n'indique que le changement climatique global causé par les activités humaines puisse se ralentir ou seulement maintenir sa vitesse actuelle. Au contraire, les émissions de gaz à effet de serre d'origine humaine ont été estimées à 9.14 GtC en 2010. Elles ont dépassé de 5.6% celles de 2009 (Boden et Blasing, 2011) ce qui constitue une hausse sans précédent (Figure 2).

La conséquence directe de l'augmentation de la concentration de gaz à effet de serre dans l'atmosphère est le réchauffement. Le taux d'émission en 2010, qui représente un nouveau maximum (vs 8.7 GtC en 2008) rend improbable le maintien de l'élévation de température moyenne globale en dessous de +2°C à l'horizon 2100. La trajectoire sur laquelle s'alignent les émissions observées depuis 1990 rejoint celles des scénarios entraînant une hausse globale moyenne de 3°C en 2050 à 6 °C en fin de siècle, avec des hausses régionales pouvant atteindre plus de 10°C sur les zones géographiques les plus exposées comme l'Europe du Sud (Figure 3).

Le très faible niveau d'engagement pris par les principaux pays émetteurs, Chine, USA, Inde, et pays industrialisés lors de la dernière conférence de Durban (décembre 2011) est très préoccupant de ce point de vue, voire alarmant. Cette situation amène désormais à considérer comme le plus probable un scénario d'emballement du climat de type catastrophique. En effet, les scénarios d'émission et de changement climatique élaborés par le GIEC sont « prudents », y compris leur dernière génération (Moss *et al.* 2010). Ils n'incluent pas le feed-back positif, quasi certain, de la libération du carbone ancien piégé dans les sols gelés en permanence (Schurr *et al.* 2009) qui représente une émission nette potentielle vers l'atmosphère d'environ 1 GtC supplémentaire par an, soit autant que la déforestation tropicale actuelle. Le permafrost renferme plus de deux fois plus la quantité de carbone présente dans l'atmosphère. Cette libération de carbone ancien est déjà en cours, seule sa cinétique demeure incertaine (Muskett et Romanovsky, 2011).

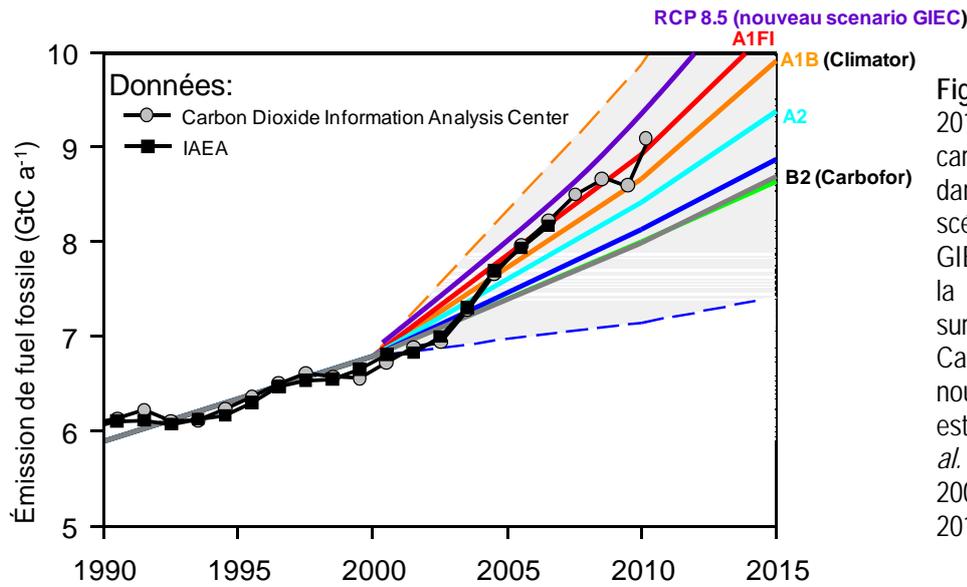


Figure 2 : Chronique 1990-2010 des émissions de carbone d'origine fossile dans l'atmosphère et scénarios d'émissions du GIEC, dont ceux utilisés pour la régionalisation du climat sur la France par les projets Carbofor et Climator. Le nouveau scénario RCP 8.5 est représenté (Raupach *et al.* 2007, Le Quéré *et al.* 2009, Friedligstein *et al.* 2010, Moss *et al.* 2010).

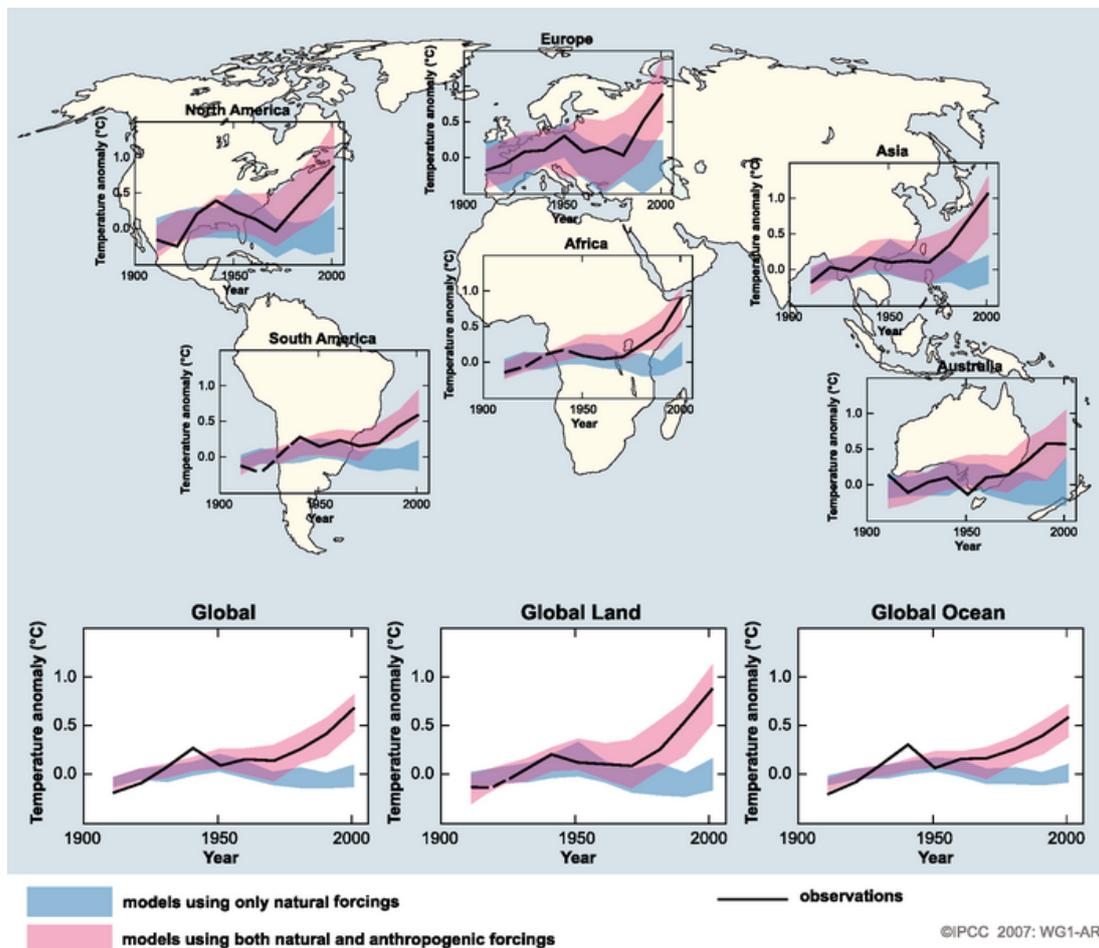


Figure 3 : Comparaison de moyennes décennales de température de surface simulées pour la période 1960 à 2005 (ligne noire) relativement à la période 1901-1950. L'aire bleutée est l'intervalle de 5 à 95% de 19 simulations produites par 5 modèles climatiques pour une atmosphère inchangée. L'aire colorée en rouge correspond à celui produit par 58 simulations de 14 modèles climatiques pour une atmosphère enrichie en carbone fossile (scénario A1B). GIEC, 4^{ème} rapport, résumé technique).

Une telle hausse des émissions de gaz à effet de serre est au-delà des scénarios 2000 du Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) et les impacts attendus sont de ce fait imprévisibles. Les observations disponibles, par exemple sur l'évolution du bilan de masse des glaciers continentaux (mission GRACE) dépassent presque systématiquement les prévisions des modèles les plus pessimistes. Gonzalez et al (2010) montrent que la répartition géographique des biomes sera affectée par des scénarios de type A, moins pessimistes et leur optimum climatique déplacé vers les pôles. En zone tempérée, plus de 10, 20 et 40% de la surface des forêts feuillues, conifères et mixtes respectivement serait vulnérable. Rien ne peut laisser penser cependant que les écosystèmes concernés pourront s'ajuster à ce déplacement climatique, qui entraînerait une remontée des aires de répartition des espèces de plus de 400 km vers les pôles (Morin et Thuiller, 2009). La forme de vie pérenne et la maturité sexuelle tardive des arbres pénalisent en effet leur capacité adaptative à des changements environnementaux abrupts comme le changement climatique en cours (Smith et Beaulieu, 2009).

Si l'adaptation des agro écosystèmes semble possible (Brisson *et al.* 2010) celle des écosystèmes peu anthropisés est très incertaine comme le montrent plusieurs observations concordantes, en Europe, Asie et Amérique du Sud. Récemment, une diminution de la croissance des arbres a été observée en plaine et dans la partie méridionale de l'aire de répartition des espèces européennes (Piovesan *et al.*, 2008 ; Filippo *et al.*, 2010 ; Carnicer *et al.*, 2011 ; Linares et Tiscar, 2011). Inversant la tendance observée au cours des deux dernières décennies du 20^{ème} siècle, une diminution de l'indice de végétation a aussi été observée sur l'ensemble des forêts tempérées et boréales eurasiennes depuis le début du siècle, et attribuée à une diminution des précipitations estivales (Piao *et al.*, 2011). La forêt tropicale amazonienne a aussi été récemment affectée par deux sécheresses sans précédent, en 2005 et 2010, qui ont annulé près de dix années d'absorption nette de carbone (Lewis *et al.*, 2011), tout comme, dans une moindre mesure, la canicule de 2003 l'avait fait en Europe.

Situation en France

Selon les données observées, la France s'est déjà réchauffée de 1°C au cours du 20^{ème} siècle. Les tendances climatiques 2000-2100 analysées par les projets *CARBOFOR* et *CLIMATOR* ont été prédites par le modèle régional *ARPEGE* de *Météo-France* (Gibelin et Déqué, 2003) et régionalisées par différentes approches des équipes du *CERFACS* et du *CNRM* (Brisson *et al.* 2010). Les simulations sont basées sur le forçage radiatif des scénarios SRES-B2, SRES-A1 et SRES-A2 qui sont autant de scénarios d'évolution de la société pendant le 21^{ème} siècle. Les scénarios A correspondent mieux à l'évolution observée de la concentration en CO₂ atmosphérique. Le scénario B sous-estime la tendance d'émission observée depuis.

Le réchauffement simulé est maximal en été et plus élevé dans les parties centrales et au sud du pays, avec des températures maximales dans la région Midi-Pyrénées. Après l'été, le réchauffement simulé le plus élevé se produit en automne. Il est similaire pour hiver et printemps, avec un réchauffement maximal dans les Alpes en raison de la rétroaction de l'albédo de la surface et de la réduction de la période enneigée. On observe que le réchauffement est généralement atténué à proximité de la mer, en raison de l'inertie de la masse d'eau océanique. Le nombre de jours des vagues de chaleur estivales (journée dont la température est de plus 5°C au dessus de la normale) augmente de façon spectaculaire (Figure 4).

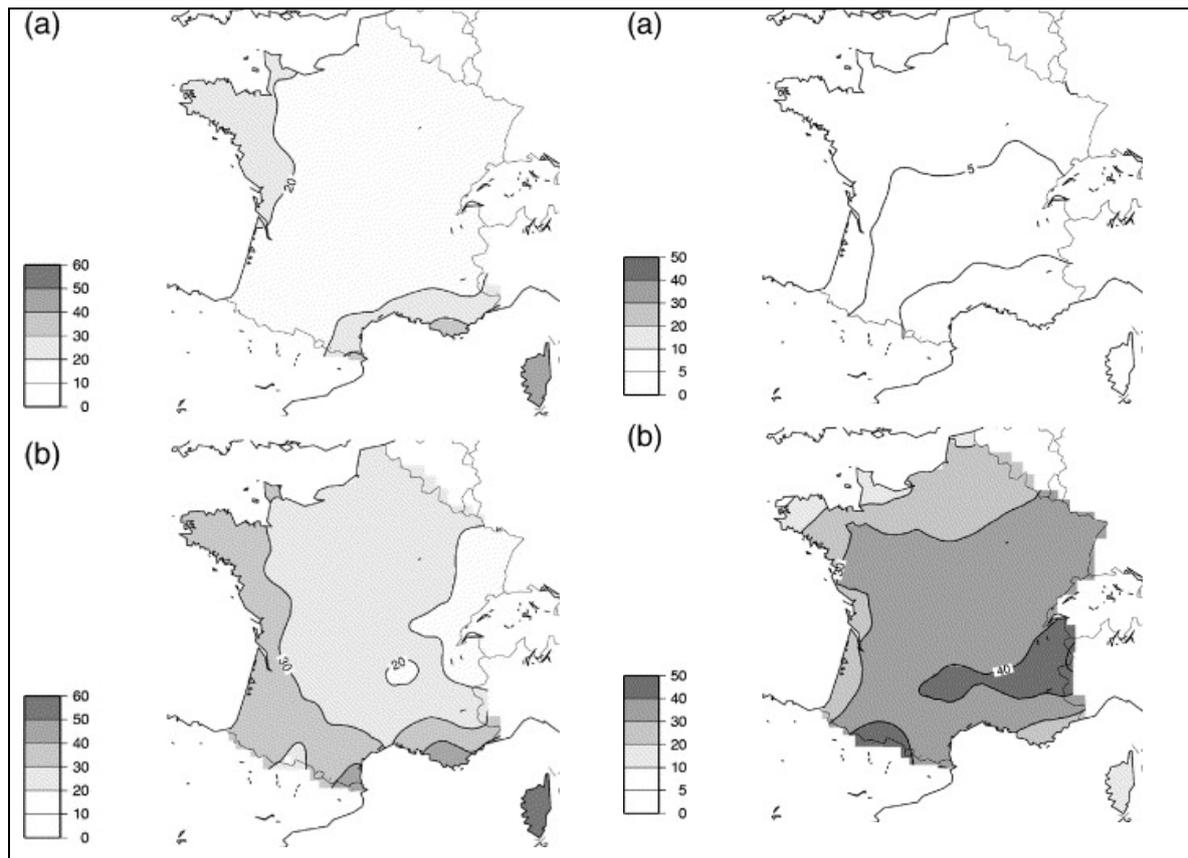


Figure 4 : Gauche : nombre maximum de « jours secs » (précipitation < 1mm) consécutifs par été selon le climat de référence (a) 1960-89 et le scénario A2 (b) 2070-99. Droite : idem, pour le nombre moyen de jours de vague de chaleur en été (au moins 6 journées consécutives où la température est de 5°C supérieure à la moyenne). (Figure tirée de Déqué et Cloppet, 2010).

Le changement climatique en cours présente de fortes disparités régionales voire même locales concernant la température, le déficit de pression de vapeur d'eau de l'air, les précipitations saisonnières (Déqué et Cloppet, 2010). Selon le scénario A, en hiver, les précipitations augmentent dans les régions du nord-ouest, nord-est, et sud-ouest de la France mais elles diminuent partout ailleurs. Au printemps, les précipitations diminuent partout et davantage dans les régions de montagne. En été, les précipitations continuent de diminuer, avec une accentuation dans la chaîne des Pyrénées. En automne, elles augmentent légèrement dans les régions septentrionales.

Ce phénomène et sa répercussion sur l'humidité du sol qui est un facteur clé de la croissance des arbres est probablement la menace majeure du changement climatique. Bien que le lien direct entre les évolutions climatiques observées et l'effet de serre soit complexe à établir, on ne peut pas ne pas remarquer que la dernière décennie a connu une succession de canicules, sécheresses et tempêtes sans précédent historique : sécheresses de 2002, 2003, 2005, 2006, 2010, 2011, canicules de 2003 et 2005, tempêtes de 1999 et 2009.

Les effets du changement climatique anthropique sur les arbres sont suspectés ou observés depuis plusieurs décennies (Becker *et al.*, 1994 ; Spiecker *et al.*, 1999). En Europe et en France, un accroissement de la production a été observé et attribué au réchauffement, aux dépôts azotés et à l'accroissement de la teneur atmosphérique en CO₂ dans la partie septentrionale des aires géographiques ou en altitude (Dhôte et Hervé, 2000). Inversement, les dépérissements d'essence dans la marge sud de leur aire de répartition comme le hêtre et le pin sylvestre sont cohérents avec les effets attendus de l'évolution du climat.

Impact du changement climatique.

Nous avons simulé l'impact de scénarios climatiques sur la production moyenne et la séquestration de carbone des grandes essences forestières de plaine, dans le cadre des projets CARBOFOR et CLIMATOR (Loustau *et al.*, 2005 ; Ciais *et al.*, 2010 ; Bréda *et al.*, 2010). Nous avons restreint ces analyses aux impacts directs de variables comme la température, l'humidité de l'air, le rayonnement et la concentration en CO₂ sur le fonctionnement et la production en bois. D'autres facteurs clés, comme les dépôts azotés ou d'ozone (Ollinger *et al.*, 2002 ; Felzer *et al.*, 2004) et la fraction de rayonnement direct/diffus (Gu *et al.*, 1999 ; Niyogi *et al.*, 2004 ; Roderick *et al.*, 2001) ne sont pas pris en compte. L'approche conduite a consisté à forcer les modèles CASTANEA (Dufrêne *et al.*, 2005), et GRAECO (Porté *et al.*, 1999) avec le scénario climatique B2, A1B et A2 pour différentes essences, zones géographiques et itinéraires techniques. Quatre tranches climatiques ont été construites à partir de la régionalisation de ARPEGE à 50 x 50 km afin d'implémenter les modèles pour un cycle sylvicole complet de la plantation à la coupe et pour quatre climats stationnaires centrés sur 1961-1990 (T0), 2001-2030 (T1), 2031-2060 (T2) et 2081-2095 (T3).

Trois zones du nord de la France, Fontainebleau, Bar-le-Duc et Sarrebourg forment un gradient de continentalité et représentent la forêt feuillue de plaine. Quatre positions, à Aire-sur-Adour, Belin-Beliet, Marmande, Toulouse sont simulées pour le Pin maritime dans la moitié Sud de la France métropolitaine (Figures 5 à 9).

Les sorties de modèles sont instructives sur plusieurs points :

- Les simulations opérées par les différents modèles de niche (Badeau *et al.*, 2010) ou de fonctionnement (Loustau *et al.*, 2005 ; Bréda *et al.*, 2010) et utilisant plusieurs schémas de régionalisation du climat produisent des résultats concordants. De surcroît, elles sont aussi cohérentes avec les prédictions de modèles de végétation à l'échelle globale, identifiant le sud de l'Europe comme une zone vulnérable pour les écosystèmes forestiers.
- Le contraste entre moitié Nord et Sud de la France est frappant, avec, dans le Nord, des tendances à un accroissement initial de la production puis une stabilisation, et une réponse inversée dans le Sud où la production diminue précocement et rapidement. Cet effet s'explique par les influences contraires du réchauffement et de la teneur en CO₂, plutôt favorables, et de l'aggravation des sécheresses, qui exerce un effet contraire.
- L'interaction entre la gestion et climat varie entre les itinéraires de sylviculture des feuillus sociaux où les scénarios de gestion plus ou moins dynamiques se différencient peu alors que l'intensification de la sylviculture de production de conifères dans le sud amplifie les effets climatiques.
- Enfin, l'analyse des tendances entre des stations de fertilité et de réserve utile contrastées montre que l'effet du climat est amplifié dans les stations les plus productives.

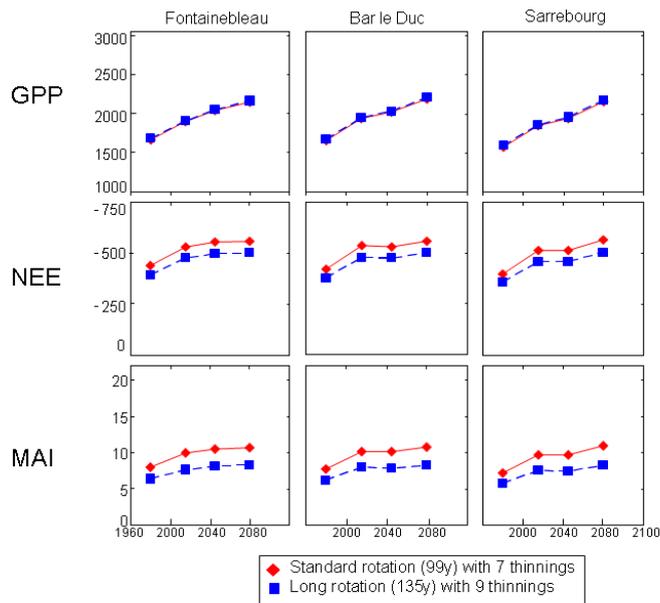


Figure 5 : Evolution entre 1960 et 2080 de la productivité primaire brute (GPP, gC.m⁻².y⁻¹), du bilan net de CO₂ de l'écosystème (NEE, gC.m⁻².y⁻¹) et de l'accroissement annuel an bois (MAI, m³ tige ha⁻¹.y⁻¹) moyennés sur toute la rotation pour deux scénarios de gestion sylvicole (rotation standard de 99 ans avec 7 éclaircies, ou rotation longue de 135 ans avec 9 éclaircies) dans le cas de peuplements de Hêtre dans trois régions le long d'un gradient Ouest-Est à travers le Nord de la France. Les prédictions correspondent à des sites fertiles ($N = 2.2 \text{ gN} \cdot 100\text{g dm}^{-1}$ dans les feuilles, réserve utile du sol = 200 mm), sous le scénario climatique B.

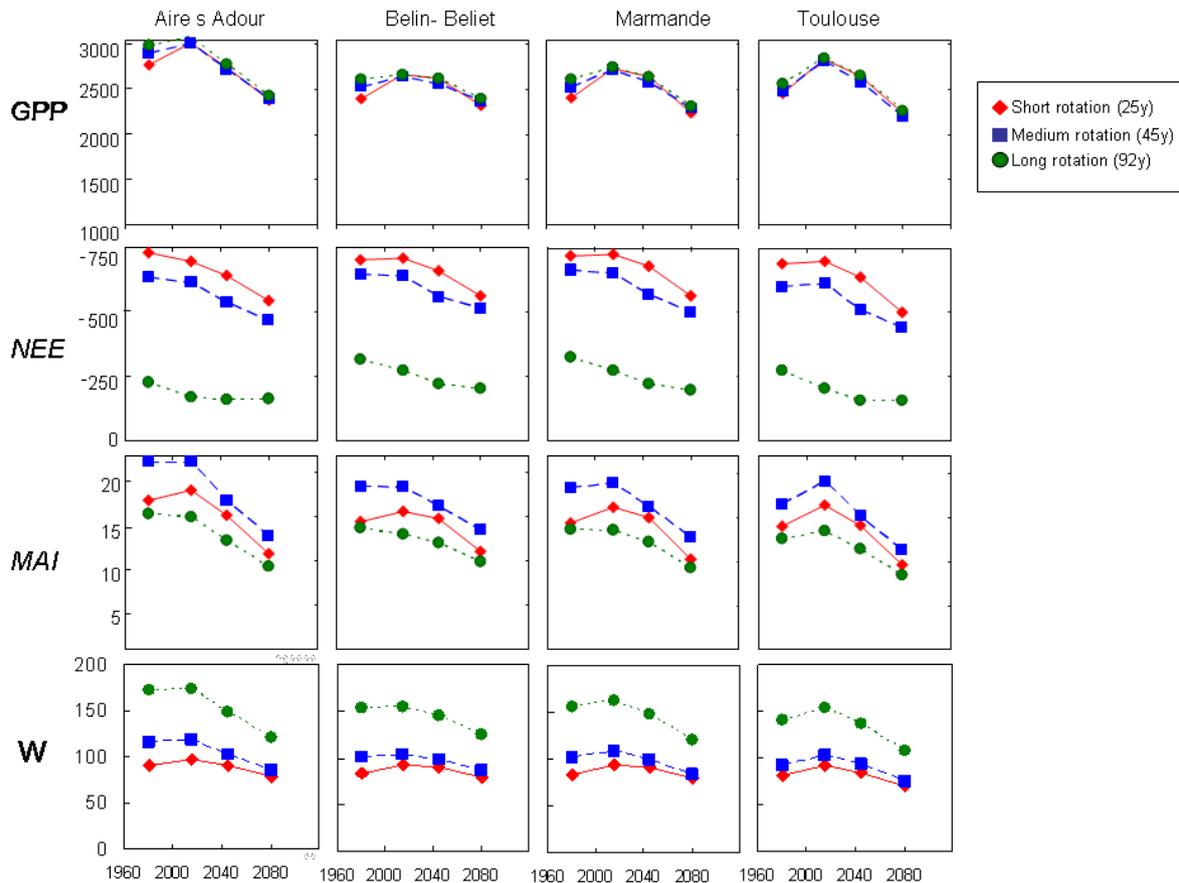


Figure 6 : Evolution entre 1960 et 2080 de la productivité primaire brute (GPP, gC.m⁻².y⁻¹), du bilan net de CO₂ de l'écosystème (NEE, gC.m⁻².y⁻¹), de l'accroissement annuel an bois (MAI, m³ tige ha⁻¹.y⁻¹) et du stock de carbone dans la biomasse W (tC.ha⁻¹), moyennés sur toute la rotation pour trois scénarios sylvicoles (rotation de 25, 45 et 92 ans) de plantations de pin maritime sur quatre sites du Sud-Ouest de la France. Les prédictions ont été réalisées pour des sites fertiles ($N = 1.5 \text{ gN} \cdot 100\text{g dm}^{-1}$ dans les aiguilles, réserve utile du sol = 150 mm) par le modèle GRAECO, sous le scénario climatique B.

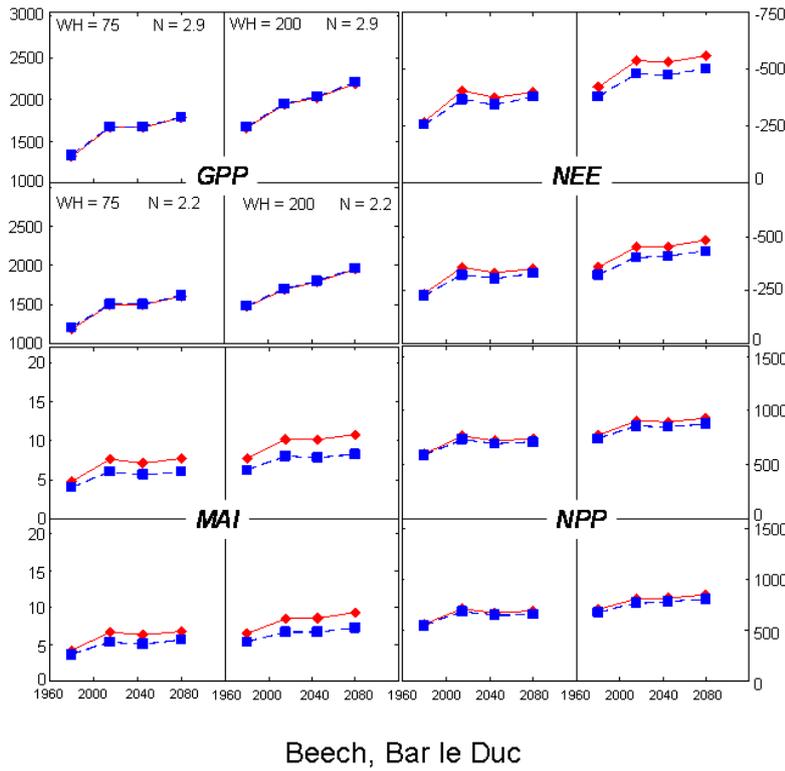


Figure 7 : Valeurs de GPP, NEE, MAI and de productivité primaire nette (NPP) moyennée sur des rotations complètes de peuplements de hêtres sur le site de Bar-le-Duc de 1960 à 2080. Pour chaque variable, 4 conditions de site combinant deux niveaux de fertilité (2.2 et 2.9 gN.100g dm⁻¹ dans les feuilles) et deux niveaux de réserve utile dans le sol (WH, 75 et 200 mm). Les indications de site n'ont été précisées que pour les figures correspondant à GPP.

Beech, Bar le Duc

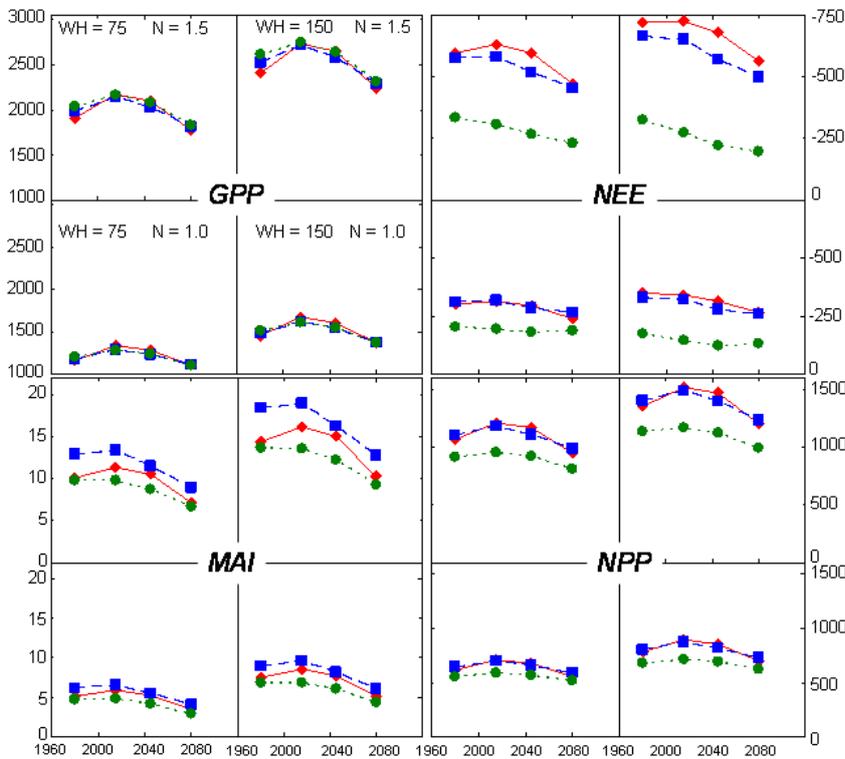


Figure 8 : Valeurs de GPP, NEE, MAI and de productivité primaire nette (NPP) moyennée sur des rotations complètes de plantations de pin maritime sur le site de Marmande de 1960 à 2080. Pour chaque variable, 4 conditions de site combinant deux niveaux de fertilité (1.5 et 1.0 gN.100g dm⁻¹ dans les feuilles) et deux niveaux de réserve utile dans le sol (WH, 75 et 150 mm). Les indications de site n'ont été précisées que pour les figures correspondant à GPP.

Maritime Pine, Marmande

Discussion

Les forêts peuvent se définir par un spectre de services environnementaux, marchands et non marchands, qui leur est propre. Assurer une durabilité de la multifonctionnalité des forêts revient alors à garantir que ces services pourront continuer à s'exercer à un horizon temporel de plusieurs générations.

Dans le contexte du changement climatique anthropique devenu largement incontrôlé, la convergence entre les prédictions de différentes familles de modèles à l'échelle globale et au niveau régional incite à leur prise en compte pour l'aide à la décision. Ainsi, nous avançons que la gestion durable des services de production et des fonctions environnementales des forêts doit conduire à proposer par ordre d'importance :

- de limiter la vitesse et l'amplitude du réchauffement climatique afin de maximiser les possibilités d'adaptation des écosystèmes forestiers. Le risque de disparition de surfaces forestières significatives dans les années à venir est avéré. La mise en place d'une politique de réduction drastique des émissions s'impose comme la première mesure à prendre pour assurer la durabilité des services écosystémiques des forêts comme le recommande prudemment le GIEC dans son 4^{ème} rapport : « *À long terme, il est probable que, si rien ne vient atténuer les changements climatiques, la capacité d'adaptation des systèmes naturels, aménagés et humains sera dépassée. Une stratégie limitée aux seules mesures d'adaptation pourrait se solder par des changements climatiques trop importants pour qu'une adaptation efficace soit possible, si ce n'est à un prix social, écologique et économique exorbitant* ». Il semble que le « long terme » évoqué en 2007 soit désormais assez proche et que l'atténuation du changement climatique soit devenue la condition préalable de l'adaptation.
- de développer le portefeuille des énergies renouvelables et parmi elles le rôle de la filière forêt – bois et fibres – énergie dans la politique de remplacement des énergies d'origine fossile, qui est potentiellement considérable. Une gouvernance territoriale appropriée et le choix de systèmes de production de biomasse optimaux et adaptables sont ici des enjeux clés pour les décideurs (Endenhofer *et al.*, 2011). Le rôle atténuateur de la forêt dans sa composante « *in situ* » et dans sa composante « substitution » (matériau, énergie) doit être exploité avec discernement en fonction des potentialités stationnelles, des capacités de transport et de transformation etc. et en s'appuyant sur l'analyse du cycle de vie.
- de favoriser l'adaptation génétique des essences forestières et des écosystèmes. La sélection naturelle semble de plusieurs ordres de grandeur trop lente pour être effective dans le contexte du changement climatique actuel. La mise en place de modes de gestion dédiés à l'adaptation assistée, impliquant des options telles que le déplacement assisté de provenances, variétés et espèces, le raccourcissement du cycle de régénération (futaie jardinée) et la sélection assistée orientée pour l'adaptation des peuplements (choix des tiges d'avenir et semenciers) pour en citer quelques unes.
- d'optimiser la conduite des peuplements de production pour la réduction des émissions de carbone fossile en tenant compte des deux compartiments de biomasse et sol, le temps de résidence du carbone, la production ainsi que l'utilisation des produits forestiers pour la substitution de carbone fossile. En Europe, les options techniques à retenir et leur déploiement dans le temps et dans l'espace peuvent être préconisées et proposées à partir des connaissances actuelles par le moyen d'expertises collectives (Arrouays *et al.*, 2002) et au sein des réseaux recherche-développement existant (comme le Réseau Mixte Technologique « Adaptation des Forêts aux Changement Climatique-AFORCE). Cette expertise fait cependant défaut dans d'autres contextes et appelle une internationalisation des projets de recherche concernés.

- d'aménager les territoires par anticipation et sous la contrainte climatique qui impose pour la sylviculture une vision dynamique et évolutive des concepts de station – production.

La faisabilité politique et technique de ces mesures est certainement le point clé de l'adaptation des forêts. Les forêts soumises à un plan de gestion (production, protection ou autres) et donc susceptibles d'être aménagées ne représentent que 60% des surfaces boisées (FRA 2010). Ces forêts peuvent faire l'objet des mesures préconisées ici et sont donc susceptibles d'une adaptation assistée par l'homme. Les forêts non gérées ou gérées de façon extensive et identifiées comme vulnérables au changement climatique sont fortement menacées. Dans la mesure où il est peu vraisemblable que les écosystèmes « naturels » aient la capacité à s'adapter aussi rapidement au changement en cours, maintenir à long terme les services de production et environnementaux des forêts, c'est à dire la superficie des surfaces boisées et leur contenu en carbone, impose donc en premier lieu de ralentir le changement climatique le plus rapidement possible.

Annexe 1 : Modèles de production

La production de bois résulte d'une chaîne relativement simple de processus biophysiques, biogéochimiques et physiologiques. Tous ne sont pas également compris et leurs interactions au niveau du peuplement est complexe. Ainsi l'intégration de cette chaîne dans un modèle complet demeure encore un défi scientifique. Ces processus mobilisent des ressources trophiques (lumière, eau, carbone et autres nutriments) et sont affectés par l'environnement physique et chimique. Pour la modélisation et la prévision des effets de changements environnementaux sur les forêts et leurs services écosystémiques, on comprend donc qu'il soit nécessaire de tenir compte des interactions entre les écosystèmes forestiers et leur environnement à différentes échelles spatiales et temporelles. A une première série de projets commencée en 2002 avec le projet CARBOFOR et son successeur CLIMATOR qui ont simulé l'impact direct de scénarios de climat sur les forêts, succède aujourd'hui une approche qui a pour ambitions d'affiner la résolution spatiale des prévisions, d'intégrer des processus supplémentaires comme l'impact de pathogènes et insectes ravageurs clés, et décrire les interactions forêts – environnement pertinentes, comme les relations rivière-nappe-végétation (Caballero *et al.*, 2007 ; Guilloit, 2011).

En France métropolitaine, la production forestière est limitée par différents facteurs comme la température, le rayonnement disponible, la concentration en CO₂, la disponibilité de l'eau et des nutriments du sol (azote et phosphore). Contrairement à l'agriculture, la sylviculture offre peu de moyens de remédier à ces limitations. L'effet potentiel de changements environnementaux est donc difficile à prédire (Nellemann et Thomsen, 2001).

Les modèles orientés pour la gestion

Les modèles empiriques de croissance et production développés à partir de relation âge – dimension - production, comme le modèle *Fagacées*, sont utilisés pour simuler la production en bois. Ils sont destinés à l'appui à la décision en sylviculture et ont effectivement permis de générer les guides de gestion utilisés en forêt publique ou privée. Ils constituent intrinsèquement une modélisation inférentielle de données observées. Leur capacité de prévision est limitée à un contexte environnemental donné et stable (Garcia-Gonzalo *et al.*, 2007).

Les modèles à base fonctionnelle

Les modèles basés sur les processus biophysiques, biogéochimiques impliqués dans le fonctionnement de l'écosystème et qui simulent la croissance et la production de bois, comme en France les modèles, *Castanea* (Dufrène *et al.*, 2005), *Graeco* (Porté, 1999 ; Loustau *et al.*, 2005), ORCHIDEE-FM (Bellassen *et al.*, 2010 a et b) ont le potentiel de décrire l'influence des variables environnementales et les effets de changements climatiques scénarisés (Davi *et al.*, 2006). Ils intègrent en effet la réponse de processus clés comme la photosynthèse, la transpiration et le bilan hydrique, la respiration, la phénologie et l'allocation du carbone à une gamme large de conditions environnementales (rayonnement incident, concentration en CO₂, température, déficit de pression de vapeur de l'air, vent, déficit hydrique du sol...) (Milne et Van Oijen, 2005 ; Davi *et al.*, 2006). Cependant, les interactions complexes entre la physiologie de la plante et l'écologie du peuplement et l'environnement ne sont pas encore bien comprises ce qui représente un verrou pour le développement de ces modèles et limite leurs applications prédictives dans un contexte de changement global.

Références bibliographiques

- Arrouays D., Balesdent J., Germon J.C., Jayet P.A., Soussana J.F., Stengel P. (eds), 2002, Contribution à la lutte contre l'effet de serre. Stocker du carbone dans les sols agricoles de France ? Expertise scientifique collective. Synthèse. INRA. 32 p. tirée de l'Expertise scientifique collective de l'INRA commandée par le Ministère de l'Ecologie et du Développement durable, oct. 2002., INRA, 331p. disponible à www.inra.fr.
- Badeau V., Dupouey J.L., Cluzeau C., Drapier J., Bas C.I., 2010. Climate change and the biogeography of French tree species: first result and perspectives. *Forests, carbon cycle and climate change*, Quae Editions, Paris, 231-252.
- Becker M., Nieminen T.M., Géréma F., 1994. Short-term variations and long-term changes in oak productivity in Northeastern France. The role of climate and atmospheric CO₂. *Annales des Sciences Forestières* 51, 477-492.
- Bellassen V., Le Maire G., Dhote J.F., Ciais P., Viovy N., 2010a. Modelling forest management within a global vegetation model. Part 1: Model structure and general behaviour. *Ecological Modelling* 221, 2458-2474.
- Bellassen V., le Maire G., Guin O., Dhote J.F., Ciais P., Viovy N., 2010b. Modelling forest management within a global vegetation model. Part 2: Model validation from a tree to a continental scale. *Ecological Modelling* 222, 57-75.
- Betts R.A., 2000. Offset of the potential carbon sink from boreal forestation by decreases in surface albedo. *Nature* 408, 187-190.
- Boden T.A., Blasing T.J., 2011. Record high 2010 global carbon dioxide emissions from fossil-fuel combustion and cement manufacture. Posted on CDIAAC Site. (http://cdiac.ornl.gov/trends/emis/perlim_2009_2010_estimates.html)
- Bonan G.B., Pollard D., Thompson S. L., 1992. Effects of Boreal Forest Vegetation on Global Climate. *Nature* 359(6397), 716-718.
- Botta A., Viovy N., Ciais P., Friedlingstein P., 2000. A global prognostic scheme of leaf onset using satellite data. *Global Change Biology* 6, 709-726.
- Bréda N., Bosc A., Badeau V., 2010. Eléments sur le changement climatique et la forêt métropolitaine. In : « Changement climatique, agriculture et forêt en France : simulations d'impacts sur les principales espèces. Le livre vert du projet CLIMATOR 2007-2010 », N. Brisson et F. Levraut, Editeurs, ADEME, pp 225-236.
- Brisson N., Levraut F., 2010. Changement climatique, agriculture et forêt en France : simulations d'impacts sur les principales espèces. Le livre vert du projet CLIMATOR 2007-2010 », ADEME, 366p.

- Caballero Y., Voirin-Morel S., Habets F., Noilhan J., LeMoigne P., Lehenaff A., Boone A., 2007. Hydrological sensitivity of the Adour-Garonne river basin to climate change. *Water Resources Research* 43(7). WOS:000248429400001
- Carnicer J., Coll M., Ninyerola M., Pons X., Sanchez G., Penuelas J., 2011. Widespread crown condition decline, food web disruption, and amplified tree mortality with increased climate change-type drought. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 108, 1474-1478.
- Ciais P., Loustau D., Bosc A., Ogee J., Dufrene E., Francois C., Davi H., Viovy N., Delage F., Piao S., 2010. How will the production of French forests respond to climate change? An integrated analysis from site to country scale. *Forests, carbon cycle and climate change*, Quae Editions, Paris, pp. 201-227.
- Davi H., Dufrene E., François C., Le Maire G., Loustau D., Bosc A., Rambal S., Granier A., Moors E., 2006. Sensitivity of water and carbon fluxes to climate changes from 1960 to 2100 in European forest ecosystems. *Agricultural and Forest Meteorology* 141, 35-56.
- Déqué M., Cloppet E., 2010. Possible future climates in France. *Forests, carbon cycle and climate change*, Quae Editions, Paris, pp. 133-143.
- Dhôte J.-F., Hervé J.-C., 2000. Changements de productivité dans quatre forêts de chênes sessiles depuis 1930 : une approche au niveau du peuplement. *Annals of Forest Science* 57, 651-680.
- Dufrene E., Davi H., François C., Le Maire G., Le Dantec V., Granier A., 2005. Modelling carbon and water cycles in a beech forest. Part I: Model description and uncertainty analysis on modelled NEE. *Ecological Modelling* 185 (2-4), 407-436.
- Dupouey J.L., Pignard G., Hamza N., Dhote J.F., 2010. Estimating carbon stocks and fluxes in forest biomass: 2. Application to the French case based upon National Forest Inventory data. *Forests, carbon cycle and climate change*, Quae Editions, Paris, pp 101-129.
- Edenhofer O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, K. Seyboth, P. Matschoss, S. Kadner, T. Zwickel, P. Eickemeier, G. Hansen, S. Schlömer, C. von Stechow (eds) 2011, IPCC, 2011: IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation. Prepared by Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1075 pp.
- Felzer B., Kicklighter D., Mellilo J., Wang C., Zhuang Q., Prinn R., 2004. Effects of ozone on net primary production and carbon sequestration in the conterminous United States using a biogeochemistry model. *Tellus*, 56B, 230-248.
- Di Filippo A., Alessandrini A., Biondi F., Blasi S., Portoghesi L., Piovesan G. 2010. Climate change and oak growth decline: dendroecology and stand productivity of a Turkey oak (*Quercus cerris* L.) old stored coppice in Central Italy. *Annals of Forest Science* 67, 706p1-706p14.
- FRA, Forest Report Assessment. 2010. FAO.
- Friedlingstein, P., R. A. Houghton, G. Marland, J. Hackler, T. A. Boden, T. J. Conway, J. G. Canadell, M. R. Raupach, P. Ciais and C. Le Quere, 2010. Update on CO(2) emissions. *Nature Geoscience* 3(12), 811-812.
- Garcia-Gonzalo J., Peltola H., Gerendai A.Z., Kellomaki S., 2007. Impacts of forest landscape structure and management on timber production and carbon stocks in the boreal forest ecosystem under changing climate. *Forest Ecology and Management* 241, 243-257.
- Gibelin A., Déqué M., 2003. Anthropogenic climate change over the Mediterranean region simulated by a global variable resolution model. *Climate Dynamics*, 20, 327-339.
- Gonzalez P., Neilson R.P., Lenihan J.M., Drapek R.J., 2010. Global patterns in the vulnerability of ecosystems to vegetation shifts due to climate change. *Global Ecology and Biogeography* 19, 755-768.
- Gu L.H., Fuentes J.D., Shugart H.H., Staebler R.M., Black T.A., 1999. Responses of net ecosystem exchanges of carbon dioxide to changes in cloudiness: Results from two North American deciduous forests. *Journal of Geophysical Research -Atmosphere* 104, 31421-31434.
- Guillot M., 2011. Analyse rétrospective des relations nappe végétation de bassins-versant affluents de la rivière Leyre. Thèse de Doctorat de l'Université de Bordeaux-1, INRA-EPHYSE.

Holdaway R.J., Sparrow A. D., Coomes D.A., 2010. Trends in entropy production during ecosystem development in the Amazon Basin. *Philosophical Transactions of the Royal Society B-Biological Sciences* 365, 1437-1447.

IPCC, 2001. *Climate Change 2001. The scientific basis. Contribution of Working Group I to the third assessment report of the IPCC.* (J. Houghton, Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. Van der Linder, X. Dai, K. Maskell, C.A. Johnson, eds.). Cambridge University Press, Cambridge, UK. 881 p.

Le Quéré C., Raupach M.R., Canadell J.G., Marland G., Bopp L., Ciais P., Conway T.J., Doney S.C., Feely R.A., Foster P., Friedlingstein P., Gurney K., Houghton R.A., House J.I., Huntingford C., Levy P.E., Lomas M.R., Majkut J., Metz N., Ometto J.P., Peters G.P., Prentice I.C., Randerson J.T., Running S.W., Sarmiento J.L., Schuster U., Sitch S., Takahashi T., Viovy N., van der Werf G. R., Woodward F.I., 2009. Trends in the sources and sinks of carbon dioxide. *Nature Geoscience* 2(12), 831-836.

Lee, X., M. L. Goulden, D. Y. Hollinger, A. Barr, T. A. Black, G. Bohrer, R. Bracho, B. Drake, A. Goldstein, L. H. Gu, G. Katul, T. Kolb, B. E. Law, H. Margolis, T. Meyers, R. Monson, W. Munger, R. Oren, T. P. U. Kyaw, A. D. Richardson, H. P. Schmid, R. Staebler, S. Wofsy and L. Zhao, 2011. Observed increase in local cooling effect of deforestation at higher latitudes. *Nature* 479(7373), 384-387.

Lewis S.L., Brando P.M., Phillips O.L., van der Heijden G.M.F., Nepstad D., 2011. The 2010 Amazon Drought. *Science* 331, 554-554.

Linares J.C., Tiscar P.A., 2011. Buffered climate change effects in a Mediterranean pine species: range limit implications from a tree-ring study. *Oecologia* 167, 847-859.

Loustau D., Pluviaud F., Bosc A., Porté A., Berbigier P., Déqué M., Pérarnaud V., 2001. Impact of a regional 2xCO₂ climate scenario on the water balance, carbon balance and primary production of maritime Pine in South-western France, In: *Models for the Sustainable Management of Plantation Forests*, (J.M. Carnus, R. Dewar, D. Loustau, M. Tomé, eds.), European Cultivated Forest Institute (EFI subdivision) EFI Proceedings numéro 41D, Bordeaux, pp 45-58.

Loustau, D., A. Bosc, A. Colin, J. Ogee, H. Davi, C. Francois, E. Dufrene, M. Deque, E. Cloppet, D. Arrouays, C. Le Bas, N. Saby, G. Pignard, N. Hamza, A. Granier, N. Breda, P. Ciais, N. Viovy and F. Delage, 2005. Modeling climate change effects on the potential production of French plains forests at the sub-regional level. *Tree Physiology* 25, 813-823.

Martin M.P., Wattenbach M., Smith P., Meersmans J., Jolivet C., Boulonne L., Arrouays D., 2010. Spatial distribution of soil organic carbon stocks in France. *Biogeosciences* 8, 1053-1065.

Milne R., Van Oijen M., 2005. A comparison of two modelling studies of environmental effects on forest carbon stocks across Europe. *Annals of Forest Science* 62, 911-923.

Morin X., Thuillier W., 2009. Comparing niche- and process-based models to reduce prediction uncertainty in species ranges shift under climate change. *Ecology* 90, 1301-1313.

Moss R.H., Edmonds J.A., Hibbard K.A., Manning M.R., Rose S.K., van Vuuren D.P., Carter T.R., Emori S., Kainuma M., Kram T., Meehl G.A., Mitchell J.F.B., Nakicenovic N., Riahi K., Smith S.J., Stouffer R.J., Thomson A.M., Weyant J.P., Wilbanks T.J., 2010. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature* 463, 747-756.

Muskett R.R., Romanovsky V. 2011. Multi-Satellite measurements of changes in water storage, land-surface temperature and atmospheric CO₂ of the Northern Eurasia permafrost watersheds. International Arctic Research Centre, University of Alaska Fairbanks, 2nd - 4th of March 2011.

Nellemann C., Thomsen M.G., 2001. Long-term changes in forest growth: Potential effects of nitrogen deposition and acidification. *Water Air and Soil Pollution*, 128, 197-205.

Niyogi D., Chang H.I., Sexana V.K., Holt T., Alapaty K., Booker F.L., Chen F., Davies K.J., Holben B., Matsui T., Meyers T., Oechel W.C., Pielke R.A., Wells R., Wilson K., Yongkang X., 2004. Direct observations of the effects of aerosol loading on net ecosystem CO₂ exchanges over different landscapes. *Geophysical Research Letters*, 31, L20506.

Ollinger S.V., Aber J.D., Reich P.B., Freuder R.J., 2002. Interactive effects of nitrogen deposition, tropospheric ozone, elevated CO₂ and land use history on the carbon dynamics of northern hardwood forests. *Global Change Biology*, 8, 545-562.

- Pan Y.D., Birdsey R.A., Fang J.Y., Houghton R., Kauppi P.E., Kurz W.A., Phillips O.L., Shvidenko A., Lewis S.L., Canadell J.G., Ciais P., Jackson R.B., Pacala S.W., McGuire A.D., Piao S.L., Rautiainen A., Sitch S., Hayes D., 2011. A Large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science* 333, 988-993.
- Piao S.L., Wang X.H., Ciais P., Zhu B., Wang T., Liu J., 2011. Changes in satellite-derived vegetation growth trend in temperate and boreal Eurasia from 1982 to 2006. *Global Change Biology* 17, 3228-3239.
- Piovesan G., Biondi F., Di Filippo A., Alessandrini A., Maugeri M., 2008. Drought-driven growth reduction in old beech (*Fagus sylvatica* L.) forests of the central Apennines, Italy. *Global Change Biology*, 14, 1265-1281.
- Porté A., 1999. Modélisation des effets du bilan hydrique sur la production primaire et la croissance d'un couvert de Pin maritime (*Pinus pinaster* Ait.) en lande humide. Thèse de doctorat, Université Paris XI, Orsay, 160 p.
- Raupach M.R., Marland G., Ciais P., Le Quere C., Canadell J.G., Klepper G., Field C.B., 2007. Global and regional drivers of accelerating CO2 emissions. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 104(24), 10288-10293.
- Roderick M.L., Farquhar G.D., Berry S.L., Noble I.R., 2001. On the direct effect of clouds and atmospheric particles on the productivity and structure of vegetation. *Oecologia*, 129, 21-30.
- Schurr E.A.G., Bockheim J., Canadell J.G., Euskirchen E., Field C.B., Goryachkin S.V., Hagemann S., Kuhry P., Lafleur P.M., Lee H., Mazhitova G., Nelson F.E., Rinke A., Romanovsky V.E., Shiklomanov N., Tarnocai C., Venevsky S., Vogel J. G., Zimov S.A., 2008. Vulnerability of permafrost carbon to climate change: implications for the global carbon cycle. *BioScience* 58, 701-714.
- Silva Dias M.A.F., Petersen W., Silva Dias P.L., Cifelli R., Betts A.K., Longo M., Gomes A.M., Fisch G.F., Lima M.A., Antonio M.A., Albrecht R.I., 2002. A case study of convective organization into precipitating lines in the Southwest Amazon *Journal of Geophysical Research*, Vol. 107, 8078, 23 Pp., 2002, Doi:10.1029/2001jd000375
- Smith S.A., Beaulieu J.M., 2009. Life history influences rates of climatic niche evolution in flowering plants. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences* 276, 4345-4352.
- Spiecker H., 1999. Overview of recent growth trends in European forests. *Water, Air and Soil Pollution*, 116, 33-46.
- Teuling A.J., Seneviratne S.I., Stockli R., Reichstein M., Moors E., Ciais P., Luysaert S., Hurk B. v. d., Ammann C., Bernhofer C., Dellwik E., Gianelle D., Gielen B., Grunwald T., Klumpp K., Montagnani L., Moureaux C., Sottocornola M., Wohlfahrt G., 2010. Contrasting response of European forest and grassland energy exchange to heatwaves. *Nature Geoscience* 3, 722-727.