

Changement climatique et forêts

Jean-Marc Guehl, Sylvie Alexandre et Jean-Luc Peyron

1. Les forêts : des enjeux pour la planète et le climat

Les forêts couvrent 4 milliards d'ha, soit 31% des surfaces terrestres du globe¹. Elles comptent parmi les écosystèmes les plus riches en espèces et en diversité génétique. Elles sont globalement l'objet d'une gestion peu intensive, très majoritairement sans intrants artificiels. Les écosystèmes restent dominés par les processus naturels, avec toutefois des divergences selon le type de renouvellement ou de création des peuplements et le degré d'anthropisation et d'exploitation. Les forêts ont un rôle socio-économique essentiel. Les ressources forestières, surtout ligneuses, alimentent un secteur industriel structuré qui emploie 13 millions de personnes dans le monde, cependant que le secteur informel en emploie près de 40 millions. De plus, 1,2 à 1,4 milliard de personnes dépendent des forêts pour leurs besoins en nourriture, fourrage, combustibles (FAO 2015). Au-delà de la fonction de production de biens, les forêts sont à l'origine d'une large palette de services écologiques contribuant au bien-être humain (par exemple régulation des climats locaux, régionaux et continentaux, protection des sols, fourniture d'eau de qualité). Le changement climatique, à travers ses impacts directs et les actions d'adaptation ou atténuation qu'il suscite, affecte positivement ou négativement chacun de ces services, modifiant ainsi les conditions de la gestion multifonctionnelle et durable des forêts.

Les forêts occupent une place importante dans les discussions sur le changement climatique. Mais leur statut y est complexe. Les déforestations tropicales se poursuivent à un rythme élevé et sont responsables d'une fraction significative des émissions de gaz à effet de serre. Parallèlement, le potentiel forestier de séquestration de CO₂ contribue à l'atténuation du changement climatique mais pourrait se réduire à l'avenir sous l'effet du changement climatique qui menace aussi l'intégrité des forêts. En outre, une exploitation accrue de biomasse ligneuse offre la possibilité d'éviter des émissions de gaz à effet de serre en substituant une ressource renouvelable à des matériaux et énergies consommant du carbone fossile.

Comment comprendre et concilier ces constats d'apparence divergente ? Les forêts sont-elles une cause d'accélération du changement climatique ou contribuent-elles au contraire à ralentir et atténuer son évolution ? Quel est l'impact prévisible du changement climatique sur les forêts en considérant la diversité liée à leur vaste répartition géographique ? Comment les forêts peuvent-elles à la fois contrer et subir le changement climatique ?

Cet article tente de répondre à ces questions en partant de constats mondiaux sur la situation des forêts face au changement climatique (sections 2 et 3) pour s'interroger ensuite sur les conséquences à en tirer pour la gestion (sections 4, 5 et 6).

2. Dynamiques forestières globales, des sources et puits de CO₂ en évolution.

Les écosystèmes forestiers concentrent des masses de carbone (C) particulièrement élevées (en moyenne 224 tonnes C par ha). Ils contiennent 60-75% du C de la biomasse végétale continentale, 40-53% du C de la biosphère continentale totale et 30-40% de la biomasse terrestre (océans et

¹ 38% (161 millions d'ha) pour l'Union européenne, 30% (17,0 millions d'ha) pour le territoire métropolitain français (chiffres FAO 2015).

continents), soit grossièrement 860 GtC (biomasse vivante et morte, matière organique des sols), l'équivalent du C du CO₂ atmosphérique (Pan *et al.* 2011).

Les évaluations périodiques des ressources forestières mondiales par la FAO (2015) sous forme d'inventaires permettent d'estimer l'évolution des surfaces et des stocks de C à l'échelle des grandes régions forestières depuis 1990. Les forêts accusent une diminution de près de 130 millions d'ha depuis 25 ans (-3%). La vitesse de déforestation diminue, mais le phénomène reste important, surtout pour les forêts naturelles tropicales.

Les émissions nettes de CO₂ liées à la déforestation ainsi qu'à la dégradation des forêts (perturbations liées à des prélèvements partiels), mais intégrant l'accumulation nette de C consécutive aux perturbations, sont évaluées à 2,9 GtCO₂eq (équivalent CO₂ du C) par an pour 2011-2015 (FAO 2015), soit 8% environ des émissions de CO₂ liées à l'utilisation de combustibles fossiles. Les valeurs plus importantes (plus de 20 %) parfois indiquées sont irréalistes car elles omettent les gains de C post-perturbations. Les évaluations montrent en outre que l'ensemble des forêts non impactées par la déforestation-dégradation, notamment les forêts tempérées et boréales dont les surfaces s'étendent par des processus naturels ou par plantation, accumulent actuellement 2,2 GtCO₂eq par an. L'approche FAO fournit donc une estimation du bilan net total des forêts mondiales de 2,9 Gt - 2,2 Gt = 0,7 GtCO₂eq émises par an ; cette estimation reste non significativement différente de 0.

Sur la base d'une approche combinant les données d'inventaires, de télédétection et de modélisation du fonctionnement des couvertures forestières, Pan *et al.* (2011) ont fourni des évaluations faisant ressortir une accumulation importante de carbone par les forêts tropicales non perturbées par l'homme (composante non intégrée dans l'approche FAO) ainsi qu'une accumulation nette de 4,0 GtCO₂eq par an (1990-2007) par les forêts mondiales, intégrant les émissions liées à la déforestation. La séquestration de carbone par les forêts ainsi évaluée est en accord avec les évaluations du rapport récent du GIEC faisant ressortir un puits de carbone terrestre continental actuel important. Cependant, l'approche GIEC considère l'ensemble du domaine Agriculture, Forêts et autres utilisations des terres (AFOLU) (Ciais *et al.* 2013, Smith *et al.* 2014) ne permettant pas d'évaluer précisément la part des forêts.

La divergence des résultats obtenus par Pan *et al.* (2011) et ceux établis par la FAO montre l'importance de l'effort restant à accomplir en matière d'inventaire, de suivi permanent, d'évaluation des stocks de biomasse et C et de modélisation pour réduire les incertitudes sur l'évaluation du bilan de carbone des forêts à l'échelle mondiale.

La vitesse du changement climatique dans le futur sera sensible à l'effet de rétroaction des écosystèmes forestiers sur la concentration atmosphérique en CO₂. Le basculement des forêts amazoniennes et des forêts boréales d'un rôle de puits de C vers celui de source de C sont à considérer avec attention (Settele *et al.* 2014).

3. Des impacts avérés, des projections vers l'avenir incertaines

La productivité des forêts tempérées européennes s'est globalement accrue au cours des dernières décennies, du fait de l'augmentation de la concentration atmosphérique en CO₂, de l'effet fertilisant des dépôts azotés de polluants émis dans l'atmosphère et du réchauffement qui a induit un allongement de la saison de croissance. Les simulations à l'aide de modèles prédictifs montrent que dans l'avenir les effets adverses liés aux températures élevées et aux sécheresses, ainsi qu'à l'augmentation des concentrations troposphériques en ozone, prédomineraient. Des diminutions locales de productivité attribuées à des dépérissements, sont déjà notés à travers les grands biomes

forestiers, y compris les forêts boréales. La vulnérabilité des forêts face à la sécheresse ne se limiterait pas aux zones actuellement les plus sèches.

Des événements climatiques extrêmes affectent les forêts à court terme. La répétition de sécheresses intenses a entraîné une mortalité des arbres, et un recul associé de certaines forêts, notamment dans le sud de l'Europe. Plusieurs études (Settele *et al.* 2014) font état d'une augmentation des incendies de forêt dans diverses régions du monde (fréquence, durée, surface brûlée). C'est le cas notamment pour la zone méditerranéenne, mais aussi de régions de la forêt boréale, en Amérique du Nord ou en Russie.

L'évolution à venir du climat devrait conduire à une modification de l'aire de répartition potentielle d'espèces d'arbres. Certaines régions vont devenir favorables à l'installation d'essences non présentes initialement ou au contraire moins adaptées à d'autres essences présentes historiquement, favorisant des dépérissements forestiers et l'élimination locale d'espèces. On peut chercher à quantifier ces évolutions en utilisant des modèles de végétation. Les simulations liées à un scénario modéré (Cheaib *et al.* 2012) (figure 1) indiquent que, à la fin du XXI^e siècle, les forêts feuillues caduques les plus productives pourraient être reléguées dans le quart nord-est de la France, tandis que des forêts semblables aux forêts méditerranéennes actuelles prédomineraient dans le Sud-Ouest.

Les différents types d'organismes des écosystèmes forestiers (arbres, champignons, insectes, *etc.*) ne réagissent pas à la même vitesse au changement climatique. En raison du temps de génération long des arbres, le potentiel de migration ou d'adaptation génétique naturelle restera le plus souvent réduit. Au contraire, des microorganismes pathogènes ou des insectes ravageurs se sont déjà étendus vers le nord. L'évolution du climat a déjà contribué à modifier le paysage sanitaire des forêts. Le cas le mieux documenté en France est celui de la chenille processionnaire des pins, un lépidoptère qui se rapproche de Paris ; mais on recense d'autres exemples tels que l'encre du chêne et la maladie des bandes rouges du pin laricio, qui sont toutes deux liées à des champignons pathogènes.

Le changement climatique peut avoir des effets en cascade qui modifient les dynamiques forestières. Des hivers plus doux et des étés plus secs ont par exemple favorisé l'explosion épidémique du dendroctone du pin ponderosa, un petit coléoptère qui a colonisé d'Ouest en Est le Nord du continent américain en s'adaptant progressivement à différentes espèces de pins. Les pins ont dépéri, ce qui a facilité la propagation des incendies et, ce faisant, la destruction de pans entiers de forêts.

Les impacts projetés restent largement incertains dans leur magnitude ou leur rapidité. Qu'elle soit liée aux différences de scénarios climatiques, aux modèles (Cheaib *et al.* 2012) ou à la compréhension encore incomplète des phénomènes, la prise en compte de l'incertitude est cruciale pour anticiper la capacité d'adaptation spontanée des écosystèmes et décider de mesures actives additionnelles (Mimura *et al.* 2014).

4. L'adaptation au changement climatique, un enjeu actuel

Les arbres sont des organismes à longue durée de vie. Une grande partie des décisions forestières courantes doivent anticiper le changement climatique de la fin du XXI^e siècle. L'incertitude sur les conditions auxquelles la forêt devra faire face est, pour les décideurs, une contrainte énorme que la recherche a encore peu réduite (Lindner *et al.* 2014) et très insuffisamment prise en compte (Keenan, 2015).

L'adaptation revêt différentes formes. Spontanée et fondée sur le fonctionnement des écosystèmes,

elle limite les impacts *a priori* du changement climatique. Cependant, la vitesse à laquelle les changements se produisent est, dans bien des cas, plus élevée que celle à laquelle les écosystèmes réagissent (Settele *et al.* 2014). Face au changement, le fonctionnement des écosystèmes forestiers doit plus que jamais être considéré dans une perspective dynamique où la question du temps - célérité des changements et temps de réponse des forêts - est primordiale. De plus, compte tenu des nombreuses incertitudes (concernant le changement lui-même, les réponses biologiques à des conditions inédites, le comportement d'un écosystème complexe ou l'impact à moyen terme des mesures adaptatives), le principal enjeu est de guider la gestion à partir de ses impacts probables sur les trajectoires du système, de gérer les transitions, plutôt que de chercher à figer un idéal à moyen ou long-terme.

Ensuite, il est important de considérer l'objet de l'adaptation. Or la forêt procure tout un ensemble de services sur lesquels le climat agit de façon différenciée. L'adaptation active des forestiers se justifie donc par la volonté d'intervenir de manière prioritaire en faveur de certains de ces services jugés de plus fort enjeu. C'est souvent le cas de la fourniture de bois et de la conservation des habitats.

Pour ce même type de raison, il y a un lien constitutif entre le degré d'anthropisation des forêts et la nature des adaptations envisagées :

- En forêt primaire (32% des surfaces forestières mondiales), sans activité humaine visible, seuls les processus écologiques et évolutifs naturels interviennent. C'est pourquoi il faut les surveiller et analyser leurs processus de résilience et d'adaptation, ce doit être un thème fort de recherche.
- En forêt semi-naturelle (61% des surfaces forestières mondiales), où la régénération reste très majoritairement naturelle (populations sauvages), des sylvicultures d'intensification contrastée sont appliquées suivant les objectifs prioritaires de la gestion : conservation et protection des milieux et espèces (*e.g.* forêts méditerranéennes ou de montagne), prélèvements individuels d'arbres de qualité dans des peuplements hétérogènes à mélanges d'espèces, sylviculture semi-intensive de peuplements homogènes avec une ou plusieurs espèces sociales dominantes (*e.g.* les futaies de plaine en France). Des options souples d'adaptation peuvent être développés (éclaircies permettant de réduire la densité des peuplements et donc les contraintes hydriques, corridors pour permettre la migration des espèces, transfert de graines lors des phases de régénération, changements progressifs d'espèces localement, *etc.*), mais leur effet restera limité en raison de l'importance des surfaces concernées et de la longévité des arbres, la longueur des cycles forestiers (jusqu'à 200 ans en Europe !) qu'il peut être intéressant de réduire pour mieux s'adapter et permettre d'anticiper plus efficacement une évolution rapide du climat.
- En forêts plantées (7% des surfaces forestières mondiales en 2015 contre 4,5% en 1990), dans lesquelles les espèces sont indigènes ou exotiques, la production est l'objectif principal dans 75% des cas et couvre de l'ordre de 40% des besoins mondiaux en bois ronds industriels. Dans les modalités les plus intensives, le modèle « ligniculture » (près de 20 % des plantations) vise une production de masse standardisée basée sur des cycles de production courts, le choix d'espèces ou variétés productives génétiquement améliorées, la fertilisation, *etc.* On se rapproche ici des conditions de l'agriculture (voir rapport sur « *L'agriculture climato-intelligente* »). Des options actives d'adaptation peuvent être mises en œuvre, notamment à travers des pratiques appropriées ou le choix d'espèces ou écotypes adaptés aux nouvelles conditions, d'autant plus facilement que les révolutions sont courtes (voir rapport sur « *Les agricultures face au dérèglement climatique : politiques d'adaptation et d'atténuation* »).

Dans les deux derniers types de forêts, on relève des points communs aux différentes options d'adaptation. En premier lieu, les essences sélectionnées doivent pouvoir supporter à la fois les conditions présentes et les conditions futures, ce qui restreint la palette habituelle des choix. Cette

constatation appelle trois réactions principales : raccourcir les cycles pour réduire les risques tout en conservant la palette, identifier de nouvelles essences, provenances ou variétés améliorées pour enrichir la palette, diversifier les essences en utilisant au mieux les possibilités de la palette. La sylviculture appliquée aux essences ou mélanges d'essences peut ensuite être adaptée au niveau de la mise en place des peuplements, de leur structure et de leur densité comme de leur répartition spatiale (voir rapport « Climat-eau ». Pour réussir, ces adaptations nécessitent la prospérité des activités du bois dont dépendent l'amélioration et le renouvellement des peuplements forestiers, ainsi que celle du secteur des pépinières qui facilite la substitution des essences et contribue en même temps à convertir des surfaces forestières semi-naturelles en forêts plantées.

5. Atténuation du changement climatique : des mesures en cascade

Les écosystèmes forestiers représentent un énorme stock de carbone sous forme de biomasse vivante et morte ainsi que de matière organique dans les sols. C'est la variation de ce stock qui modifie la concentration en gaz carbonique de l'atmosphère et joue un rôle principal sur le changement climatique, comparativement aux autres facteurs de forçage climatiques liés au cycle de l'eau (évapotranspiration), à l'énergie (albédo) ou à d'autres gaz à effet de serre (méthane, protoxyde d'azote) auxquels les forêts contribuent peu (Ciais *et al.* 2013). Dans une atmosphère s'enrichissant progressivement en dioxyde de carbone, on s'attend à observer un puits de carbone à large échelle. Les interventions humaines modifient considérablement les échanges entre la forêt et l'atmosphère, ce qui justifie leur orientation vers l'atténuation du changement climatique selon deux grands modes d'action : le changement d'occupation des sols (déforestation ou boisement) et l'exploitation forestière.

La déforestation mais aussi des perturbations comme les incendies et la dégradation des forêts, aboutissent à l'émission de grandes quantités de gaz carbonique dans l'atmosphère. Un axe important des actions d'atténuation s'attache à réduire ces émissions (dispositif REDD+). Renforcées par des considérations climatiques, les politiques de lutte contre la déforestation et la dégradation favorisent des actions de développement local fondées sur des outils réglementaires et incitatifs (Nabuurs *et al.* 2007) ; elles ont parfois à éviter les effets d'autres politiques incitatives, à combattre les déterminants extérieurs aux zones concernées (mainmise sur les terres résultant de demandes extérieures au secteur forestier).

A l'inverse, le boisement des terres permet de constituer progressivement un puits de carbone tout en contribuant à l'extension des forêts plantées dans le monde. Cependant, lorsque ces plantations sont réalisées en lieu et place de forêts naturelles voire semi-naturelles, le puits de carbone peut se transformer en source pendant de longues années (voir ci-après) et la diminution du stock de carbone qui s'ensuit doit être inscrite au débit de la plantation.

Qu'elle vise à récolter du bois, ou à renouveler les peuplements, l'exploitation forestière modifie les puits et sources de carbone de multiples manières avec des bénéfices divers aux différentes échelles temporelles. Cela explique l'ampleur des débats sur cette question (Basilico, 2008 ; Ademe, 2015) et la nécessité d'optimiser les formes d'intervention. La contribution du secteur forêt-bois à l'atténuation du changement climatique peut se résumer à deux grands types de processus ou facteurs :

- la forêt est le siège d'une séquestration nette de carbone qui alimente les stocks de biomasse aérienne et souterraine, y compris la matière organique du sol ;
- les activités du bois induisent une variation de stock dans les produits en bois et surtout évitent des émissions de carbone fossile aussi bien lorsque le bois est utilisé comme matériau (substitution matériau) qu'à titre énergétique (substitution énergie).

L'exploitation forestière approvisionne les activités du bois. A court terme, elle réduit le puits de carbone de la biomasse vivante. A moyen et long termes elle stimule la séquestration nette de carbone en soutenant la croissance forestière et en limitant la mortalité des arbres. Les possibilités d'atténuation du changement climatique s'appuient sur ces différents processus qui restent trop souvent considérés de façon séparée. Ainsi, deux modalités d'action ont jusque là été principalement privilégiées :

- une comptabilité de la séquestration de carbone en forêt s'est développée dans le cadre de la convention "climat" et de son protocole de Kyoto ; elle s'inscrit dans une démarche globale concernant les sources et puits de carbone de l'ensemble des activités mais a souvent fait l'objet d'une interprétation limitée au strict périmètre forestier ; il en est résulté des conclusions erronées en faveur d'un maintien ou de l'augmentation du puits de carbone forestier, donc d'un prélèvement réduit de bois en forêt, sans considérations des inconvénients qui en résultent pour les activités du bois, la substitution et le bilan carbone global de la filière forêt-bois ;
- la bioénergie s'est développée sur la base de la neutralité carbone accordée à ses émissions pour éviter des doubles comptes après avoir considéré que le carbone de la biomasse repart vers l'atmosphère dès la récolte en forêt ; son développement s'est fait en érigeant cette neutralité en règle d'action et en sous-estimant parallèlement la capacité d'atténuation de la substitution matériau (EEA Scientific Committee, 2011).

Or, la substitution matériau a, selon toute vraisemblance, une capacité d'atténuation équivalente, voire supérieure à celle de la bio-énergie (Sathre, O'Connor, 2010 ; Lundmark *et al.* 2014 ; Ademe 2015), qui peut être augmentée à la faveur de la valorisation des co-produits et d'un recyclage ou d'une récupération des produits, y compris pour une utilisation énergétique en fin de vie. Des simulations à l'échelle nationale ont été réalisées en Suisse dès 2008 et ont conduit à populariser cette stratégie sous la dénomination "en cascade" (Taverna *et al.* 2007).

Les analyses réalisées dans des cadres temporels et géographiques précis restent rares et sont pourtant nécessaires pour prendre en compte le niveau effectif des stocks et puits forestiers initiaux de carbone, leur dynamique, les risques qui pèsent sur eux, les conditions dans lesquelles la ressource est mobilisée et utilisée, le cycle de vie des produits, le bilan carbone qui en résulte au cours du temps dans différents scénarios (Hetemäki, 2014). Outre la Suisse, la Suède a récemment publié une telle approche (Lundmark *et al.* 2014). En France, les études se poursuivent au niveau forestier (Colin, 2014) pour caractériser le puits forestier dans la biomasse aérienne et racinaire des arbres et son évolution au cours des décennies qui viennent selon le niveau d'exploitation des forêts². Parallèlement les recherches sont en cours pour préciser les facteurs de substitution à utiliser dans les conditions françaises et vérifier que les substitutions associées à une augmentation des prélèvements en forêt compenseraient la réduction correspondante à court et moyen termes du puits forestier de la biomasse vivante³.

Manifestement, les règles actuelles internationales de comptabilisation du carbone séquestré ou évité par la filière forêt-bois sont insuffisantes et ne permettent pas véritablement de fonder une

² Pour les forêts métropolitaines de production, ce puits est estimé à environ 71 MtCO₂eq. en 2013, soit 14 à 15% des émissions anthropiques françaises de gaz à effet de serre. Il pourrait se situer en 2030 dans une fourchette entre 85 et 50 MtCO₂eq. sur la base d'un scénario sylvicole tendanciel et d'un scénario augmentant les prélèvements de bois (Colin, 2014). Ces chiffres n'incluent ni le puits de carbone dans le bois mort, ni celui dans la matière organique des sols, qui sont vraisemblablement tous deux très significatifs.

³ L'effet de substitution est actuellement estimé aux alentours de 30 MtCO₂eq. dont 17 MtCO₂eq. au titre de l'énergie (Ademe, 2015). L'augmentation du stockage dans les produits en bois serait quand à elle faible, inférieure à 5 MtCO₂eq. (Ademe, 2015).

politique efficace d'atténuation du changement climatique. Il est temps de le reconnaître pour proposer à partir d'elles, ou en parallèle, une méthode globale d'évaluation du bilan carbone de la forêt et du bois.

6. Conclusions : vers une gestion forestière intégrée répondant aux enjeux climatiques

Le changement climatique est susceptible d'agir fortement sur les forêts dont il modifie le fonctionnement et les services rendus à la société. Inversement, les interventions humaines en forêt pèsent sur lui et occupent pour cela une place importante dans les négociations internationales. Elles comprennent la déforestation et la dégradation des formations boisées qu'il convient de combattre plus que jamais. Mais elles s'expriment de manière plus positive à travers la gestion durable des forêts qui est confrontée au défi de satisfaire les attentes de la société en services écosystémiques tout en luttant contre l'effet de serre et en réduisant les impacts du réchauffement planétaire dont on présume qu'ils ne pourront être totalement évités. Atténuation et adaptation s'avèrent indéfectiblement liées entre elles et au sein du développement durable. Dans ce contexte, faire face au changement climatique consiste finalement à évaluer toute option de gestion sous les deux angles complémentaires de l'atténuation et de l'adaptation.

La gestion durable des forêts agit sur le changement climatique à divers horizons de temps et de multiples façons : elle peut l'atténuer ou le renforcer, en réduire ou aggraver les impacts, de manière très différente à court, moyen ou long terme. L'évaluation à réaliser est donc complexe et empreinte d'incertitudes. Ces dernières, comme le changement climatique, ne peuvent être totalement réduites et méritent donc d'être gérées. La connaissance est encore lacunaire dans ce domaine et des progrès sont particulièrement attendus sur les deux axes de la réduction et de la gestion des incertitudes. Des avancées majeures ne seront obtenues à cet égard qu'en couplant recherches en sciences de la nature, des technologies et de la société.

La faisabilité technique et économique des mesures envisagées est rarement évoquée. Or elle est largement subordonnée à la capacité des industries à absorber les bois qui devront être coupés soit pour s'adapter et prévenir les risques, soit pour traiter les perturbations qui n'auront pu être évitées, soit pour économiser des énergies fossiles. Se pose également le problème de l'acceptabilité sociale des changements induits par le climat ou décidés pour relever les défis lancés à la foresterie. Il concerne les gestionnaires forestiers eux-mêmes et, bien sûr, les populations locales et plus largement l'ensemble de la société.

Références bibliographiques

1. Ademe, 2015. Forêt et atténuation du changement climatique. Les avis de l'Ademe, juin 2015, 12 p.
2. Basilico L., 2008. La filière forêt-bois européenne : des bio-réponses aux nouveaux enjeux climatiques et énergétiques ? Résumé pour décideurs de la conférence internationale qui s'est tenue à Nancy en novembre 2008 dans le cadre de la présidence française de l'Union européenne. Ecofor, 13 p.
3. Cheaib, A., V. Badeau, J. Boe *et al.*, 2012: Climate change impacts on tree ranges: model intercomparison facilitates understanding and quantification of uncertainty. *Ecology Letters*, 15(6), 533-544.
4. Ciais, P., C. Sabine, G. Bala *et al.*, 2013: Carbon and Other Biogeochemical Cycles. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker *et al.*

- (eds.]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WG1AR5_Chapter06_FINAL.pdf
5. Colin A., 2014. Émissions et absorptions de gaz à effet de serre liées au secteur forestier dans le contexte d'un accroissement possible de la récolte aux horizons 2020 et 2030. Contribution de l'IGN aux projections de puits de CO₂ dans la biomasse des forêts gérées de France métropolitaine en 2020 et 2030, selon différents scénarios d'offre de bois. Rapport final, mars 2014, convention MEDDE.DGEC/IGN, 58 p.
 6. FAO, 2015. Evaluation des ressources forestières mondiales 2015. Comment les forêts de la planète changent-elles ? Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture, Rome, 50 p.
 7. Hetemäki L. (ed.), 2014. Future of the European Forest-Based Sector. Structure Changes Towards Bioeconomy. Joensuu: European Forest Institute, What Science Can Tell Us 6, 108 p.
 8. Keenan R.J., 2015. Climate change impacts and adaptation in forest management: a review. *Annals of Forest Science* (2015) 72, pp. 145-167.
 9. Lindner M., Fitzgerald J.B., Zimmermann N.E., Reyer C., Delzon S., van der Maaten E., Schelhaas M.J., Lasch P., Eggers J., van der Maaten-Theunissen M., Suchow F., Psomas A., Poulter B., Hanewinkel M., 2014. Climate change and European forests: What do we know, what are the uncertainties, and what are the implications for forest management? *Journal of Environmental Management* 146 (2014), pp. 69-83.
 10. Lundmark T., Bergh J., Hofer P., Lunström A., Nordin A., Chandra Poudel B., Sathre R., Taverna R., Werner F., 2014. Potential Roles of Swedish Forestry in the Contexte of Climate Change Mitigation. *Forests* 2014 (5), pp. 557-578.
 11. Mimura, N., R.S. Pulwarty, D.M. Duc, I. Elshinnawy, M.H. Redsteer, H.Q. Huang, J.N. Nkem, and R.A. Sanchez Rodriguez, 2014: Adaptation planning and implementation. In: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 869-898.
 12. Nabuurs G.J. *et al.*, 2007. Mitigation of climate change. In : Metz B. *et al.* (eds), *IPCC Climate Change 2007, (III)*, Cambridge Univ. Press, pp.541-584.
 13. Nabuurs G.J., Lindner M., Verkerk P.J., Gunia K., Deda P., Michalak R., Grassi G., 2013. Forst signs of carbon sink saturation in European forest biomass. *Nature climate change*, vol.3, Sept 2013, pp. 792-796.
 14. Pan, Y., Birdsey R.A., Fang J., 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., Rautiainen A., Sitch S., Hayes D., 2011: A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science*, **333**, 988–993.
 15. Sathre, R. and O'Connor J. 2010. *A Synthesis of Research on Wood Products and Greenhouse Gas Impacts*, 2nd Edition. Vancouver, B.C. FPInnovations. 117 p
 16. Settele, J., R. Scholes, R. Betts *et al.*, 2014: Terrestrial and inland water systems. In: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects.*

- Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field *et al.* (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 271-359. http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg2/WGIIAR5-Chap4_FINAL.pdf
17. Smith P., M. Bustamante, H. Ahammad *et al.*, 2014: Agriculture, Forestry and Other Land Use (AFOLU). In: Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Edenhofer, O. *et al.* (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg3/ipcc_wg3_ar5_chapter11.pdf
 18. Taverna R., Hofer P., Werner F., Kaufmann E., Thürig E. 2007: The CO₂ Effects of the Swiss Forestry and Timber Industry. Scenarios of future potential for climate change mitigation. Environmental studies n°0739. Federal Office for the Environment, Bern. 102 p.

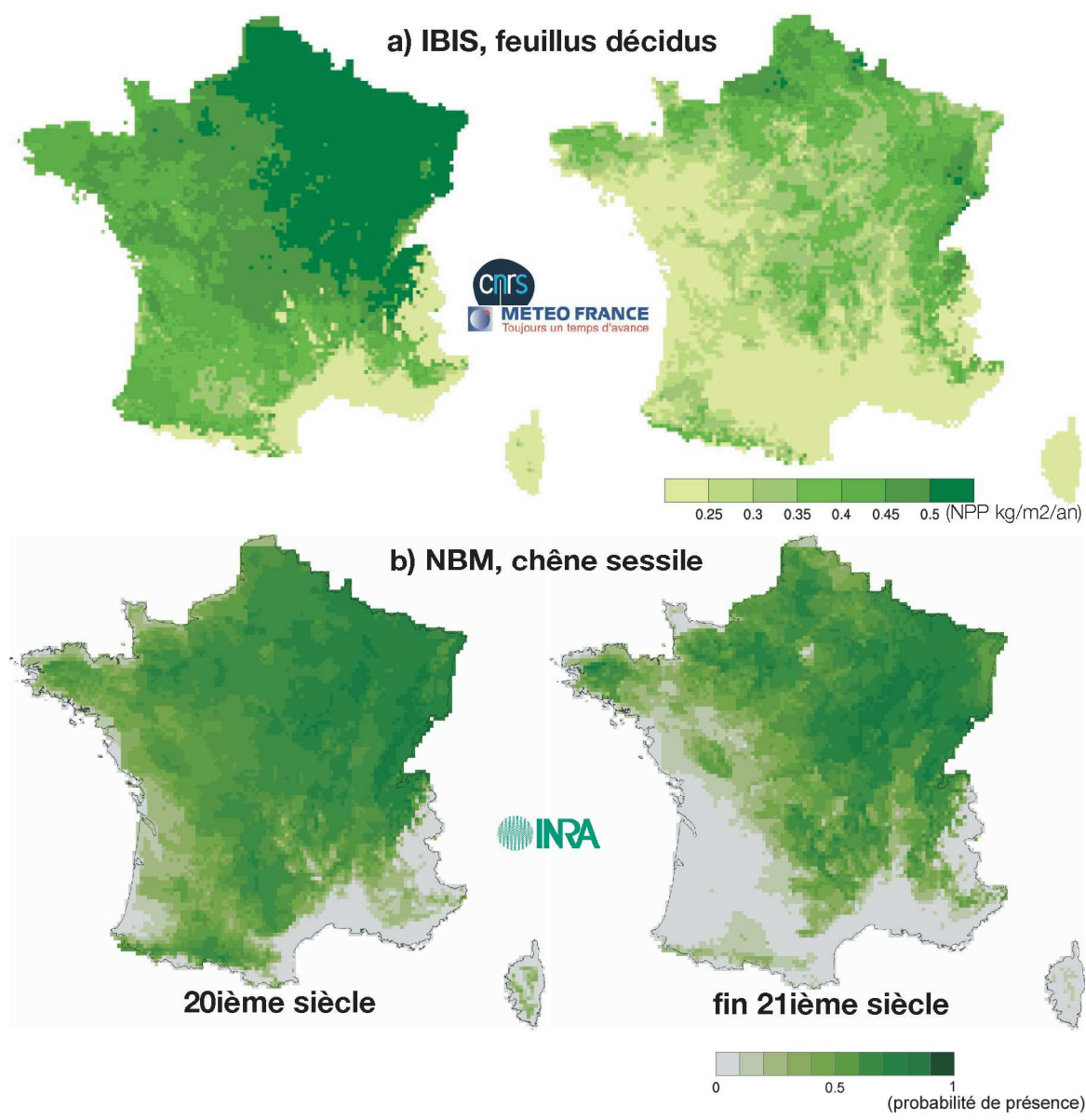


Figure 1. a). Productivité primaire des feuillus décidus simulée par le modèle IBIS b). Probabilité de présence du chêne sessile simulée par le modèle NBM (INRA-Nancy) pour le 20^{ème} siècle (gauche) et la fin du 21^{ème} siècle (droite) pour le scénario climatique « A1 » du GIEC. (Cheaib *et al.* 2012)