

Le changement climatique est-il avéré ?

La question du changement climatique est aujourd'hui bien documentée grâce à une mobilisation scientifique internationale sans précédent (GIEC : groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) ouvrant ainsi la porte à une action politique aux niveaux mondial (convention des Nations-Unies sur le climat et COP : Conférences des Parties), et national (en France, par exemple, loi sur la transition énergétique). Quelles sont les évolutions constatées et à venir ? Quelles sont leurs causes ? Quels sont les impacts observés et attendus ?

Quelles sont les principales évolutions observées ?

Pour les **températures** (figures 1 et 2), les données recueillies montrent que le **réchauffement du système climatique est sans équivoque** depuis les années 1950. Beaucoup de changements observés sont sans précédent depuis des décennies, voire des millénaires (ce qu'indiquent différentes analyses rétrospectives).

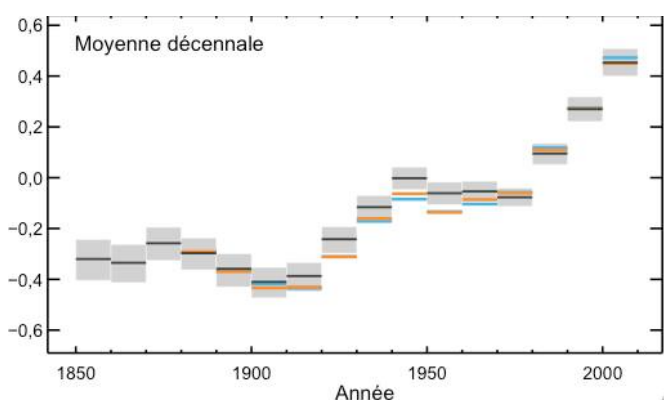


Figure 1. Évolution des températures moyennes décennales observées à la surface du globe de 1850 à 2012 (source IPCC)

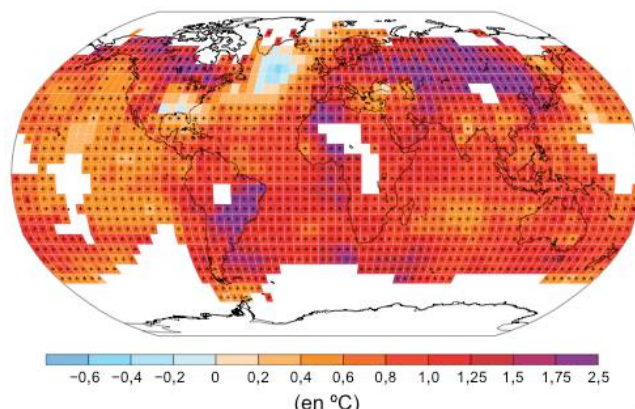


Figure 2. Changements observés des températures moyennes de surface de 1901 à 2012 (source IPCC)

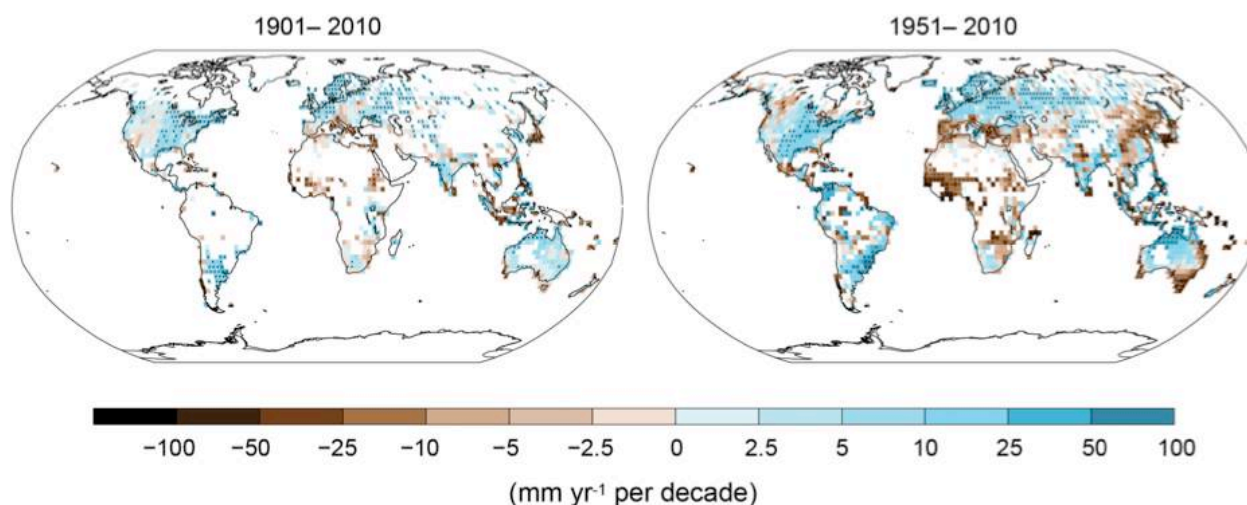


Figure 3. Changements observés des précipitations en mm/décennie (source IPCC)

Pour les **précipitations**, on constate en Europe une augmentation aux latitudes plus élevées, mais une diminution au sud ; l'Afrique connaît également un régime plus sec (fig. 3).

Corrélativement on observe une **fonte des glaciers terrestres, et des calottes glaciaires arctique et antarctique** et une **montée du niveau des mers**, due à cette fonte et surtout à la dilatation thermique de l'eau de mer liée au **réchauffement des océans**. La banquise connaît également une fonte importante.

Quelles en sont les causes ?

Les **concentrations atmosphériques des gaz à effet de serre** : dioxyde de carbone, méthane et protoxyde d'azote ont augmenté pour atteindre **des niveaux sans précédent** depuis au moins 800 000 ans. La concentration du dioxyde de carbone a augmenté de 40 % depuis l'époque préindustrielle. Cette augmentation s'explique en premier lieu par l'utilisation de combustibles fossiles et en second lieu par le bilan des émissions dues aux changements d'utilisation des sols (déforestation tropicale, suppression de prairies permanentes). Les océans ont certes absorbé environ 30 % des émissions anthropiques de dioxyde de carbone, ce qui a d'ailleurs entraîné une acidification de leurs eaux (fig. 4 a et b).

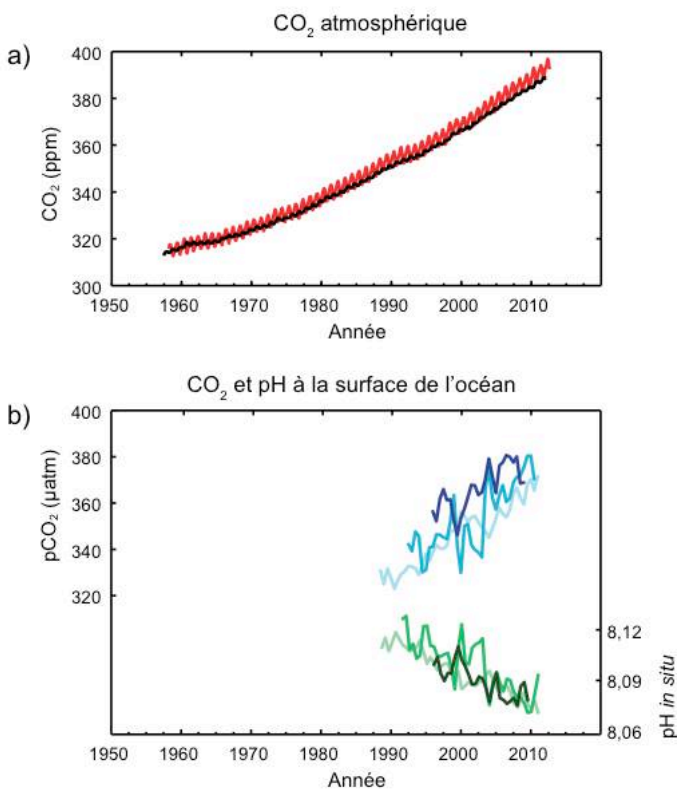


Figure 4. Évolution de la teneur en CO₂ de l'atmosphère et des eaux océaniques de surface, ainsi que de leur pH. (source : IPCC)

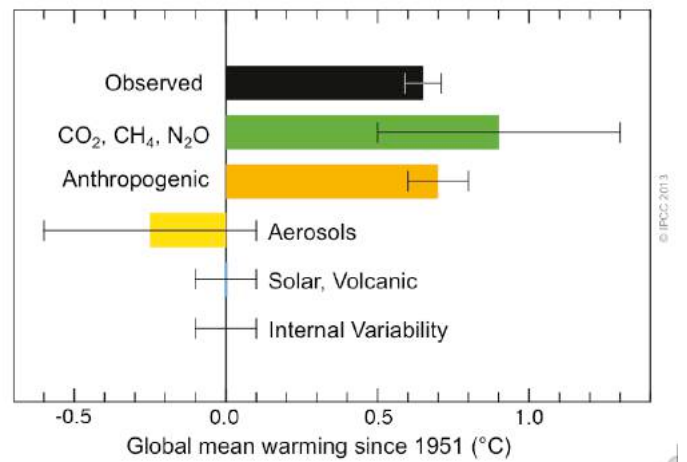


Figure 5. Augmentation observée de la température moyenne du globe depuis 1951, et estimation de l'augmentation de température liée à l'émission de gaz à effet de serre et à la diminution liée à l'émission d'aérosols. Les facteurs naturels (activité solaire, volcans, variabilité interne) n'ont pas d'effet significatif sur le long terme. Les activités humaines sont donc bien responsables du réchauffement. (source IPCC)

On définit le **forçage radiatif** comme la différence entre l'énergie reçue et celle émise par le système climatique planétaire qui, *in fine*, détermine le réchauffement planétaire. Or on constate que le forçage radiatif total est positif et a conduit à une absorption nette d'énergie par le système climatique. La plus grande contribution à ce forçage radiatif provient de l'augmentation de la teneur de l'atmosphère en CO₂ depuis 1750.

L'influence de l'homme sur le système climatique est clairement établie, et ce, sur la base de données concernant : l'augmentation des concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère, le forçage radiatif positif que cela entraîne, le réchauffement observé et la compréhension du système climatique (fig. 5).

Quelles projections de l'évolution du climat ?

Les projections du climat et de certains de leurs impacts sont basées sur un ensemble de modèles mathématiques fondés sur des scénarios de forçage anthropiques correspondant à des niveaux de concentration en CO₂ différents à l'horizon 2100, en fonction de l'intensité des émissions de CO₂. Quatre nouveaux types de scénarios climatiques, ou plutôt d'hypothèses de scénarios formulées par le GIEC, sont fondés sur différentes valeurs de forçage radiatif, liées à autant d'hypothèses d'atténuation des émissions anthropiques de gaz à effet de serre.

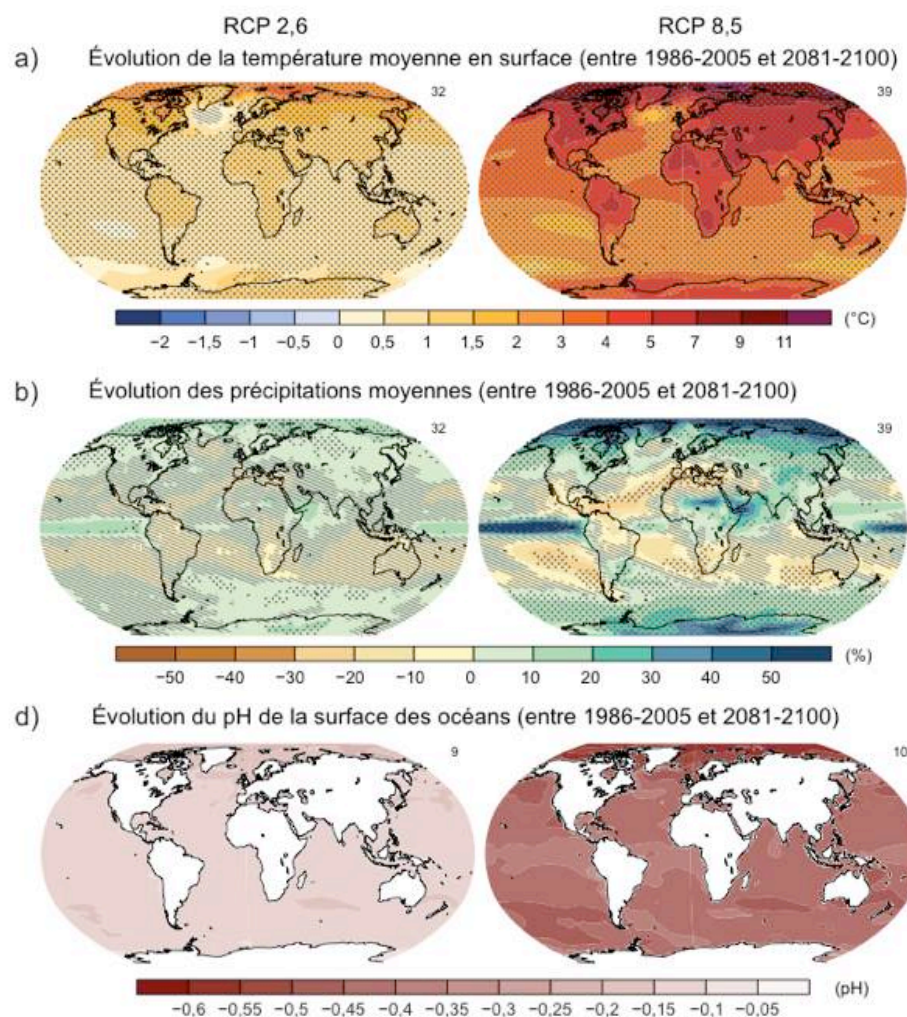


Figure 6. Projections selon deux scénarios de forçage radiatif de l'évolution des températures moyennes de surface, des précipitations, et du pH de la surface des océans. - (Source : IPCC)

Les résultats des projections (fig. 6) font apparaître : i) un **réchauffement généralisé** avec de fortes variations régionales, **jusqu'à + 4° C en moyenne** ; ii) un régime de précipitations contrasté avec des zones plus arrosées (ex. : nord de l'Europe) et plus sèches (ex. : Méditerranée) ; iii) une acidification généralisée des océans. Ils montrent également un rétrécissement drastique de la banquise

Quels impacts observés et attendus du changement climatique ?

Les impacts sur les **systèmes physiques** (glaciers, calottes glaciaires, neige et pergélisols, et tous les systèmes hydrologiques) sont déjà notables : les changements dans les précipitations, la fonte des neiges et des glaces altèrent les systèmes hydrologiques, affectant les ressources en eau en quantité et qualité. Le changement climatique cause aussi le réchauffement et le dégel des pergélisols. Sécheresses et inondations, érosion côtière et effets liés au niveau de la mer sont déjà à l'oeuvre. Les projections sur le siècle à venir montrent une amplification de ces impacts.

Concernant les **systèmes biologiques**, et les écosystèmes terrestres, d'eau douce et marins, on observe le déplacement de l'aire naturelle de nombreuses espèces, de leurs activités saisonnières, de leur vitesse de migration, de leur abondance, et des interactions entre espèces, en réponse au changement climatique qui se poursuit. On commence à observer des extinctions d'espèces et surtout de populations, notamment aux limites des aires naturelles (par exemple, le pin sylvestre en région méditerranéenne française). Les projections du climat au cours et au delà du XXI^e siècle, font apparaître une probable modification de la composition spécifique des écosystèmes (nouveaux «assemblages» d'espèces). Mais elles montrent aussi un risque important d'extinction d'espèces dans les écosystèmes terrestres et d'eau douce, en particulier parce que le changement climatique interagit avec d'autres facteurs de stress, comme la modification des habitats, la surexploitation, la pollution et les espèces invasives. Des informations plus détaillées concernant les **écosystèmes forestiers** sont présentées dans la fiche 6.02.

Pour les systèmes **anthropiques** et gérés, les impacts concernent la production alimentaire, les moyens de subsistance, les infrastructures et d'autres facteurs économiques. L'encadré ci-dessous, présente quelques informations relatives à l'Europe sur les impacts du changement climatique déjà opérant et surtout attendus.

Il convient également de noter que l'expression locale des impacts du changement climatique est très diverse et n'a pas systématiquement un impact négatif. Ainsi la productivité des forêts va probablement augmenter dans les régions boréales. Le Canada et la Russie voient d'un bon oeil l'ouverture des routes maritimes de l'arctique.

Pour autant on doit s'attendre à des **impacts considérables des phénomènes climatiques extrêmes**, tels que les canicules, les sécheresses, inondations, cyclones tropicaux et les grands incendies de végétation. Certains écosystèmes et de nombreux systèmes anthropiques montrent une vulnérabilité et une exposition au risque accrues, liées à la variabilité actuelle du climat.

Quels risques en Europe pour nos sociétés liés aux impacts du changement climatique ? (source : IPCC)

- Augmentation des pertes économiques et des populations affectées par les inondations liées aux rivières et à la mer, en relation avec un accroissement du pic des crues, une urbanisation accrue, l'élévation du niveau de la mer et l'érosion des côtes.
- Restrictions d'eau liées à : i) une réduction significative de la disponibilité de l'eau prélevée dans les rivières ou les aquifères, combinée à une demande accrue d'eau pour les besoins domestiques, de l'agriculture (irrigation), de l'énergie et de l'industrie ; ii) une réduction du ruissellement et du drainage, résultant d'une augmentation de l'évapotranspiration des couverts végétaux (particulièrement dans l'Europe du Sud).
- Augmentation des pertes économiques et du nombre de populations affectées par les événements thermiques extrêmes (canicule), avec des impacts négatifs sur le bien-être et la santé humaine, la productivité du travail, le rendement des récoltes, la qualité de l'air et les risques d'incendie des espaces boisés au sud de l'Europe et dans les régions boréales (Russie).

Ce qu'il faut retenir

- Le changement climatique est avéré et les activités humaines en sont largement responsables : émission de gaz à effet de serre
- Les projections montrent que le seuil de réchauffement de +2°C au-dessus duquel les impacts seront sévères sera franchi
- Les impacts sur les systèmes physiques, biologiques et anthropiques déjà observés et futurs sont considérables. Ils justifient une action immédiate de réduction de l'émission de gaz

Le changement climatique : quels impacts sur les forêts ?

Les évolutions continues du climat et les phénomènes climatiques extrêmes ont déjà affecté les écosystèmes forestiers dans leur composition et leur fonctionnement. Quels sont les réponses et les effets observés ou attendus ? Quels sont les mécanismes naturels d'adaptation ? À quoi pourraient ressembler les forêts du futur ? Les incendies de forêt vont-ils s'aggraver ?

Quelles sont les principales réponses des arbres et des écosystèmes forestiers aux changements climatiques ?

Les réponses des arbres et des écosystèmes forestiers aux changements climatiques sont très diverses, elles concernent : leur physiologie (cf. fig. 1), leur vitesse de croissance, leur phénologie (c'est-à-dire le calendrier des végétaux : éclosion des bourgeons au printemps, floraison, chute des feuilles, etc.), leur capacité de reproduction, la composition des communautés végétales et animales, les modifications des stocks et flux de carbone, etc. Concernant ce dernier point, il faut remarquer qu'il y a **rétroaction entre l'atmosphère et les forêts : en situation de stress hydrique marqué, la forêt peut devenir émettrice nette de carbone, aggravant ainsi les effets du changement climatique.** Les processus impliqués permettent souvent aux arbres et aux écosystèmes de s'adapter (cf. section suivante). Mais l'intensité du changement climatique et sa rapidité

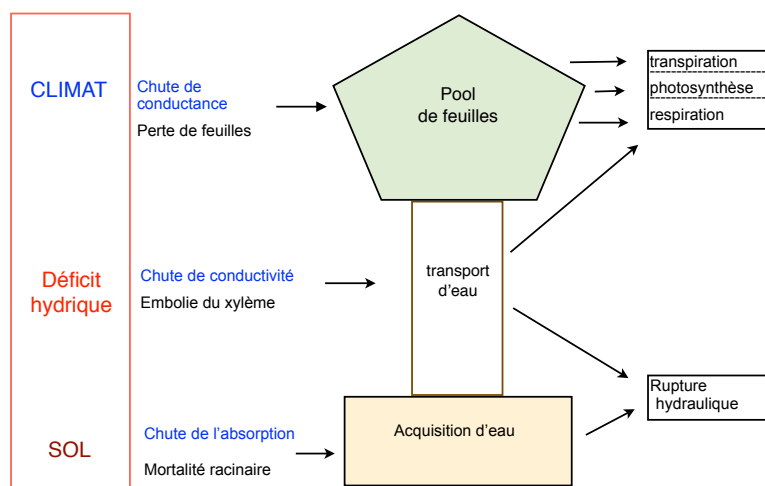


Figure 1. Effet de la sécheresse sur les arbres : le déficit hydrique présent dans l'air et dans le sol affecte : i) l'acquisition d'eau par les racines et leur survie ; ii) son transport par les vaisseaux conducteurs du tronc sujets au risque d'embolie ; iii) le système foliaire et son fonctionnement (échanges gazeux : photosynthèse et transpiration). La réponse de l'arbre peut être rapide et/ou à long terme ; elle peut se traduire par une rupture hydraulique et/ou un manque de carbone. En cas d'action prolongée, le stress peut conduire à la mort de tout ou partie de l'arbre.
Source : Lefèvre et al, 2013

peuvent se conclure par l'occurrence de risques : les plus souvent mentionnés concernent les incendies les bio-agresseurs (insectes, maladies), les dépérissements liés au stress hydrique (sécheresses) en particulier dans la partie méridionale de l'Europe, voire les tempêtes hivernales dans les zones boréales aux sols gelés moins longtemps. Les processus évoqués peuvent aussi offrir des opportunités. Par exemple, certaines projections montrent que l'augmentation de la croissance et de la production de bois des forêts en Europe, déjà observée à la fin des années 1990, pourrait se poursuivre au moins à court et moyen terme dans les parties nordiques ou océaniques de l'Europe. Ce phénomène est lié à l'augmentation des températures moyennes, de la teneur atmosphérique en CO₂ et de la pollution azotée due aux activités humaines, et peut agir là où l'eau n'est pas un facteur limitant.

Comment les arbres s'adaptent-ils au changement climatique ?

Comme d'autres êtres vivants, ils peuvent utiliser trois mécanismes (fig. 2) : i) l'acclimatation ou **plasticité phénotypique** : les arbres peuvent survivre et continuer à pousser et se reproduire parce qu'ils ont des exigences écologiques flexibles et peuvent naturellement réagir à une condition environnementale par une modification de forme ou d'état (le phénotype) ; toutefois, en cas de stress plus sévère, les arbres peuvent subir une perte de croissance, des dépérissements ou des mortalités ponctuelles, avant que ne survienne une mortalité massive; ii) l'**adaptation génétique** : la génération suivante possède des caractères différents, plus efficaces, après sélection naturelle des individus et gènes les plus adaptés ; iii) la «fuite» par la **migration** : selon les espèces, les graines se dispersent plus ou moins loin et germent dans des conditions plus favorables (sols plus profonds ou mieux alimentés en eau), ou bien le pollen s'hybride avec une espèce ou une population locale plus résistante. Ces mécanismes naturels d'adaptation peuvent rencontrer toutefois des limites. Pour ne citer qu'un exemple, l'adaptation génétique peut requérir plusieurs générations (en pratique plus d'un siècle), ce qui peut être trop lent face à la rapidité du changement climatique (fig.3).

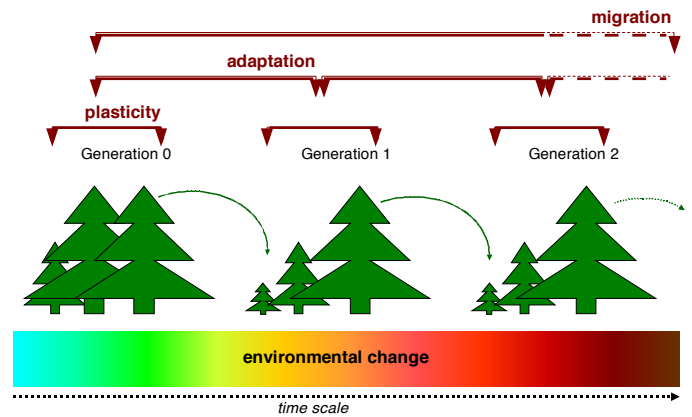


Figure 2. Les échelles de temps de l'adaptation en forêt. Il faut prendre en compte : le temps du changement environnemental (échelle du bas), le temps de l'action à son effet, le temps de génération. Source Lefèvre et al. 2013

Migration des espèces et réchauffement climatique : une course de vitesse où les arbres peinent à « suivre le mouvement »

Dans la figure 3, les barres verticales blanches indiquent pour chaque type d'espèces (1 : arbres - 2 : plantes herbacées - 3 : mammifères ongulés - 4 : mammifères carnivores - 5 : rongeurs - 6 : primates - 7 : insectes phytophages - 8 : mollusques d'eau douce) l'amplitude et la médiane de la vitesse maximum de déplacement. Les lignes horizontales de couleur expriment au niveau planétaire et pour de grandes régions plates la vitesse de déplacement des températures pour chacun des scénarios de changement climatique considérés par le GIEC comme liés aux niveaux des émissions de gaz à effet de serre (A : RCP8.5 régions de plaine - B : RCP6.0 régions de plaine - C : RCP 4.5 régions de plaine - D : RCP 8.5 moyenne mondiale - E : RCP6 moyenne mondiale - F : RCP 4.5 moyenne mondiale - G : RCP 2.6 régions plates et moyenne mondiale). Les interventions humaines, telles que les transports et la fragmentation des habitats peuvent grandement accroître ou décroître les vitesses de déplacement des espèces. Les espèces dont les vitesses maximum sont inférieures au niveau des lignes horizontales vont difficilement pouvoir suivre le réchauffement en l'absence d'intervention humaine.

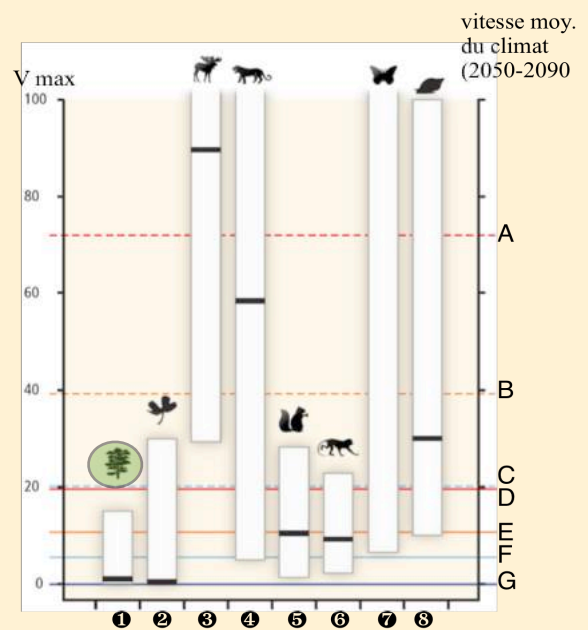


Figure 3. Vitesses maximum (V max) auxquelles les espèces peuvent se déplacer dans des paysages (km/10 ans) d'après des observations et des modèles, comparées aux vitesses auxquelles les températures vont se déplacer selon les modèles prédictifs de changement climatique. Source : GIEC AR 5, 2014

A quoi pourraient ressembler les forêts européennes dans 100 ans ?

Cette question a été récemment abordée par une équipe internationale à partir de **simulations** fondées sur des scénarios du changement climatique du GIEC (augmentation de température de 1,4 à 5,8°C d'ici 2100). Les chercheurs ont utilisé une base de données de 6 129 placettes forestières réparties à travers l'Europe selon une grille de 16 x 16 km et recouvrant environ 206 millions d'hectares de forêt, ainsi qu'un modèle à haute résolution capable de prédire la présence ou l'absence potentielle de 32 essences en fonction de ces scénarios. Même avec un changement climatique modéré, les changements de température et de précipitations influenceront fortement sur les aires potentielles de la plupart des essences (cf. fig. 4A). Les aires d'espèces productives exigeantes en humidité, telles que l'épicéa et le hêtre, vont se réduire (cf. fig. 4B) au profit d'espèces plus adaptées à la sécheresse (exemple, chênes et pins méditerranéens) mais à faible valeur économique. D'ici 2100, une telle évolution pourrait réduire singulièrement la valeur économique des forêts de 14 à 50 % (cf. fig. 5C), ce qui équivaudrait, en l'absence de mesures efficaces, à une perte potentielle de plusieurs centaines de milliards d'euros. S'agissant de simulations, une interprétation prudente s'impose, mais les tendances observées sont claires.

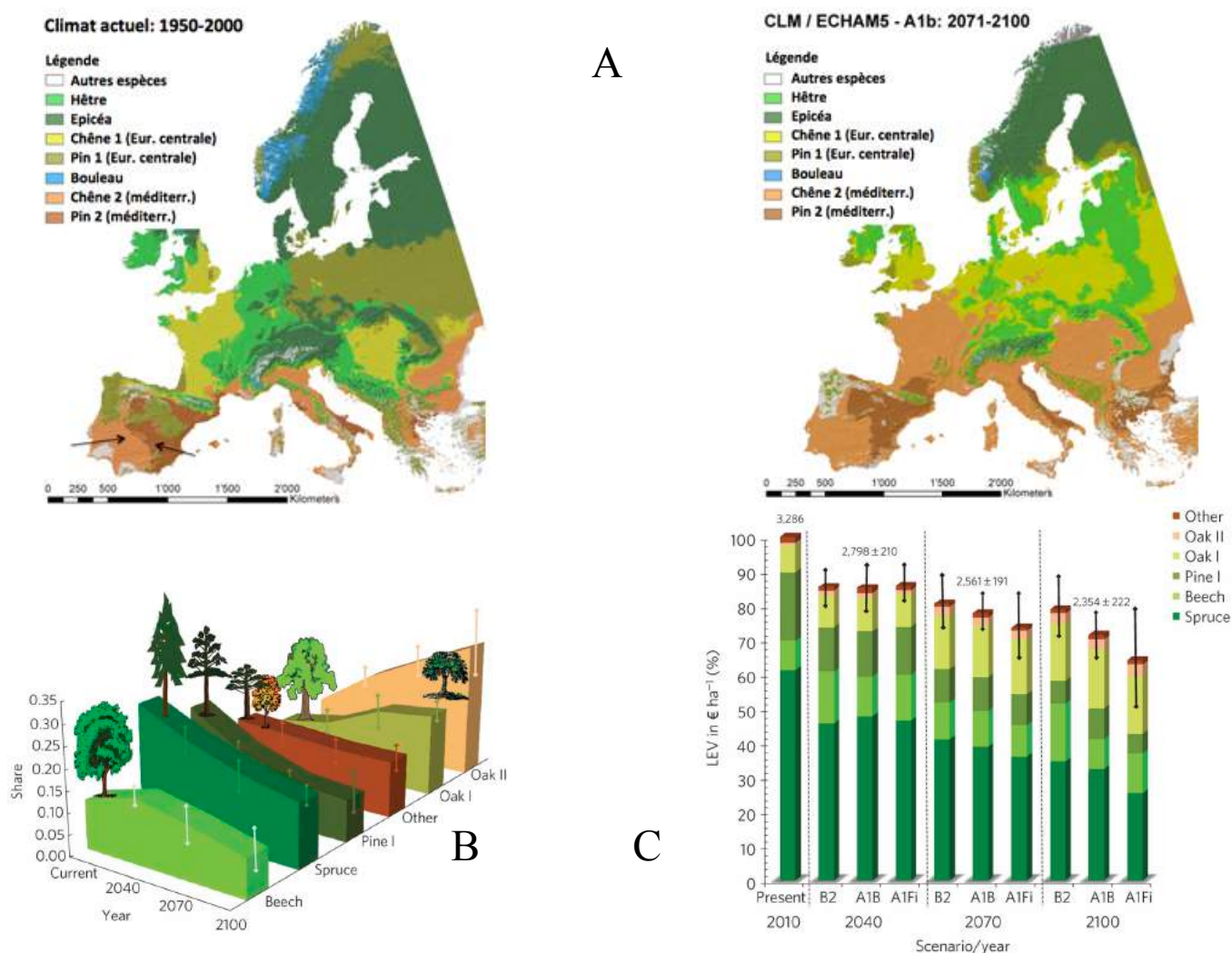


Figure 4. Évolutions modélisées de la distribution des forêts en Europe et de leur valeur économique : le projet MOTIVE (source : Hanewinkel et al., Nature Climate Change 2012)

- A : Répartition potentielle des principales essences forestières en Europe : a) à gauche, période actuelle ; b) à droite, avec le scénario A1B (réchauffement modéré, 2070-2100).
- B : Évolution des proportions de la surface occupée par ces essences avec ce scénario jusqu'en 2100.
- C : Évolution de l'estimation de la valeur actualisée des forêts (LEV) selon 3 scénarios du GIEC (2010-2100), par rapport à l'année de référence 2010 (= 100%) avec un taux d'intérêt moyen de 2%.

Le changement climatique va-t-il aggraver le risque d'incendies de forêt en France ?

L'accroissement des températures et des sécheresses estivales en France, et l'augmentation probable de leurs manifestations extrêmes (comme en 2003) vont aggraver le risque d'incendie de forêts dans les régions où il sévit déjà, et l'étendre à de nouvelles aires géographiques. La moitié de la surface forestière métropolitaine pourrait être exposée à l'aléa «feu». Ces résultats sur la sensibilité potentielle des massifs forestiers aux incendies de forêt (fig.6) doivent conduire à **revisiter les stratégies nationales de gestion de ce risque et d'allocation de moyens à la prévention et la lutte.**

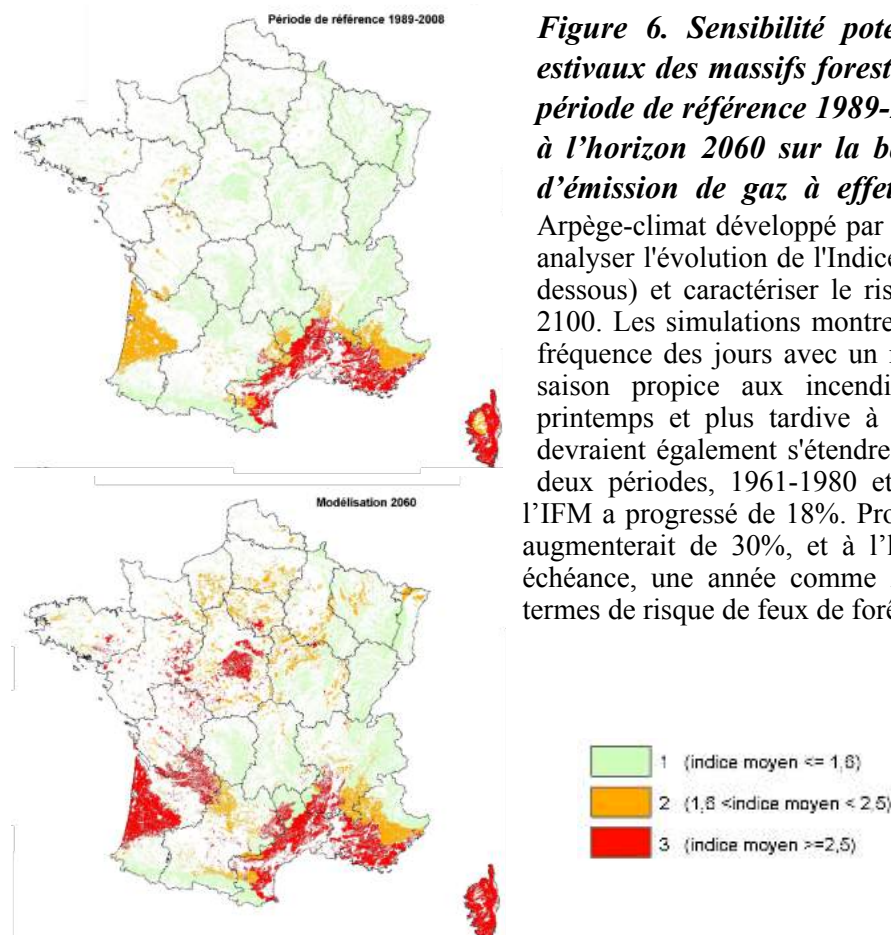


Figure 6. Sensibilité potentielle aux incendies de forêts estivales des massifs forestiers de plus de 100 ha ; en haut, période de référence 1989-2008 ; en bas, valeurs modélisées à l'horizon 2060 sur la base d'un scénario vraisemblable d'émission de gaz à effet de serre. En utilisant le modèle Arpège-climat développé par Météo-France, les chercheurs ont pu analyser l'évolution de l'Indice Forêt-Météo (IFM, voir encadré ci-dessous) et caractériser le risque d'incendie, de 1958 à l'horizon 2100. Les simulations montrent une augmentation constante de la fréquence des jours avec un risque de feux de forêt, ainsi qu'une saison propice aux incendies plus longue (plus précoce au printemps et plus tardive à l'automne). Les territoires à risque devraient également s'étendre vers le nord de la France. Entre les deux périodes, 1961-1980 et 1980-2008, la valeur moyenne de l'IFM a progressé de 18%. Projetée à l'horizon 2040, cette valeur augmenterait de 30%, et à l'horizon 2060 jusqu'à 75%. À cette échéance, une année comme 2003 deviendrait ainsi la norme en termes de risque de feux de forêt. Source : Chatry et al. 2010

L' Indice Forêt-Météo (IFM) : cet indice estime le risque de feux de forêt en intégrant la probabilité de départ d'un feu et son risque de propagation. Météo-France le calcule quotidiennement sur tout l'Hexagone et transmet ces informations à la sécurité civile. Il est calculé à partir de données météorologiques simples : température, humidité de l'air, vitesse du vent et précipitations. Ces composantes alimentent un modèle numérique simulant le temps ou le climat, pour représenter l'état hydrique de la végétation et le risque d'incendie qui en découle. Il est possible de calculer un IFM jour par jour pour différentes périodes de temps passées, présentes ou futures en utilisant un modèle climatique pour cette projection.

Recommandation : la lecture de cette fiche peut être complétée par celle des fiches 5.01, 5.03, 5.04, 5.05, 5.06, 6.01, 6.03, 6.08

Ce qu'il faut retenir

- Les réponses des forêts au changement climatique sont très diverses et impliquent de nombreux processus
- Les mécanismes naturels de l'évolution pourraient s'avérer trop lents pour permettre aux arbres de s'adapter
- Des projections laissent entrevoir des modifications majeures de l'aire potentielle des essences et un impact globalement négatif sur la valeur économique des forêts
- Le risque d'incendie va menacer une zone géographique très étendue

Les processus évolutifs naturels seront-ils suffisants pour permettre aux forêts de s'adapter au changement climatique ?

Cette question correspond à une préoccupation récurrente émanant d'audiences aussi variées que la communauté scientifique, les pouvoirs publics, les organismes gestionnaires des forêts, et le public au sens large. Elle naît du constat que la longueur des générations des arbres pourrait constituer un frein à l'évolution biologique devant permettre une adaptation aux changements environnementaux, qui ont été considérablement accélérés au cours des décennies récentes. Ces changements constituent en effet un vrai défi évolutif qui ne peut être surmonté que de deux manières : la migration ou l'adaptation. On comprend aisément que la fuite vers d'autres horizons, ou le maintien sur place au prix d'une adaptation substantielle sont les seules alternatives permettant d'assurer le maintien de l'espèce ou de la population. Avant d'aborder ces deux mécanismes, il est pertinent de s'inspirer des leçons du passé et de l'histoire biologique des espèces. En effet le monde vivant a été confronté de manière récurrente, certes sur de plus grandes échelles de temps, à des modifications climatiques majeures. Et les études rétrospectives, associant paléobotanique, paléoécologie et génétique des populations, ont permis de retracer les trajectoires évolutives des arbres au cours de ces crises environnementales. La connaissance de ces trajectoires nous permet d'identifier les mécanismes évolutifs que les espèces risquent d'emprunter dans le futur.

Que nous apprend le passé sur les réponses des arbres au changement climatique ?

Pour rappel, l'histoire récente au cours du quaternaire –à l'échelle des temps évolutifs- a été marquée par une succession de périodes froides ou glaciaires (durant généralement plus de 100 000 ans), alternant avec des périodes chaudes ou interglaciaire (de durée plus courte). Les amplitudes de variations climatiques au cours de ces alternances étaient supérieures à celles prévues dans le contexte du changement climatique d'origine anthropique en cours. On peut dégager cinq grands enseignements relatifs aux réponses des arbres à ces changements environnementaux passés :

- Il y a eu un tri sélectif majeur, par sélection naturelle, lors des tous premiers cycles de périodes glaciaires/interglaciaires. Nombre d'espèces présentes en Europe à la fin du tertiaire ont été éliminées. *A contrario*, les espèces qui ont passé ce tri ont été fortement «sélectionnées» pour leur capacité à migrer et/ou à s'adapter.
- La migration des espèces au cours des périodes de réchauffement et déduite des analyses paléobotaniques (notamment pollen fossile) a généralement été plus rapide que celle prédite par la dispersion due aux seuls vecteurs biotiques (insectes, oiseaux) ou abiotiques (vent). D'autres processus, dispersion stochastique (aléatoire) à très longue distance ou maintien de micropopulations refuges à haute latitude durant les périodes froides, doivent également être invoqués pour expliquer cette rapidité.
- Il y a eu adaptation locale, par suite de sélection naturelle induite par les changements climatiques. C'est l'un des enseignements majeurs des tests de provenances installés depuis plusieurs décennies en Europe: les populations locales ont localement généralement les valeurs adaptatives les plus élevées.
- Les espèces ont maintenu leur diversité génétique lors du dernier réchauffement. Il n'y a pas eu de perte de diversité occasionnée par la migration vers le nord. Quel que soit le niveau auquel cette diversité est

mesurée (gènes ou caractères, cf. fiche 2.06), la diversité à l'intérieur d'une forêt manifeste peu de variation géographique et représente généralement un échantillonnage assez complet de la diversité totale de l'espèce.

- Le dernier réchauffement postglaciaire a conduit à restaurer des échanges de gènes entre espèces interfertiles, ou entre populations (voire écotypes = populations d'une espèce présentant des spécificités génétiques liées à l'environnement local) d'une même espèce qui avaient auparavant été isolées dans les refuges au Sud de l'Europe. Certains de ces échanges, ont facilité, voire accéléré l'adaptation aux nouvelles conditions de milieu

Que peut-on dire des capacités de migration future ?

Les modélisations d'enveloppe bioclimatique (elle se définit comme les contours de l'aire géographique dont le climat (températures, précipitations) correspond aux exigences écologiques d'une espèce) des espèces forestières dans le contexte des changements climatiques prédisent un déplacement des enveloppes vers le nord et l'est de plusieurs centaines de kms d'ici un siècle. Bien qu'il existe une forte incertitude sur l'ampleur de cette translation, l'échelle de grandeur est très largement supérieure aux distances de migration naturelle des arbres déduite des analyses historiques. Par ailleurs les capacités de migration durant l'époque actuelle risquent en plus d'être inférieures à celles qui ont eu cours durant l'Holocène, à cause notamment des obstacles de nature très différente générés par les activités humaines. Même si la migration était rapide au cours des changements climatiques naturels et passés, relativement à la migration prédite par la dispersion par les vecteurs biotiques (insectes, oiseaux) ou abiotiques (vent), elle est aujourd'hui toujours inférieure à celle qui serait nécessaire pour suivre le déplacement des enveloppes bioclimatiques (fig. 1). C'est ce constat qui a suscité le vif intérêt des gestionnaires pour une migration artificielle par plantation, généralement qualifiée de migration assistée (voir fiche 6.07).

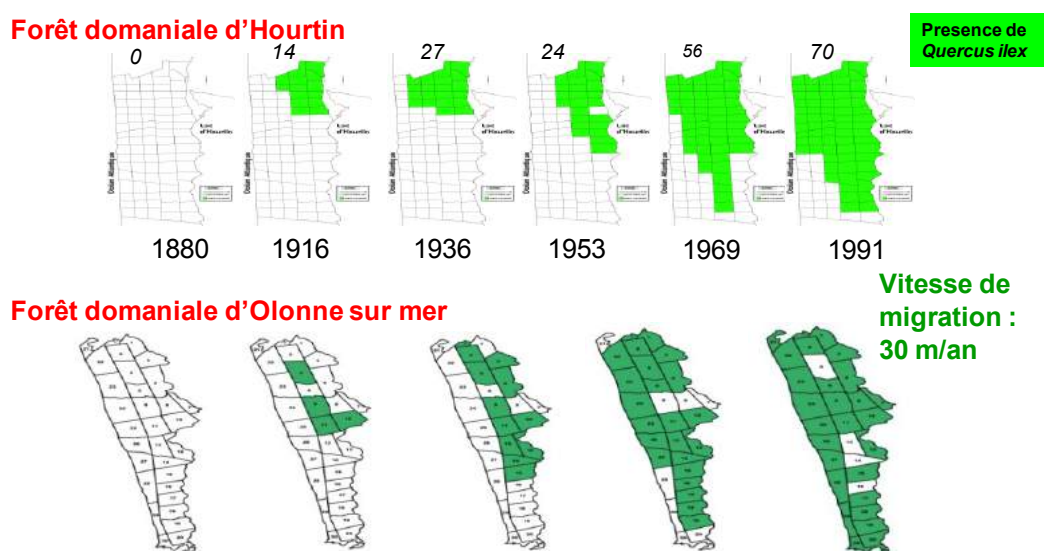


Figure 1. Migration du chêne vert (*Quercus ilex*) dans les forêts situées le long de la côte atlantique

Ces cartes représentent la présence de chêne vert (couleur verte) sur les parcelles de deux forêts domaniales, tels qu'ils ont pu être extraits des documents d'aménagement de ces forêts au cours du siècle dernier. On constate tout particulièrement une colonisation progressive de la partie orientale de ces forêts par le chêne vert. *A priori*, la colonisation résulte principalement de processus naturels de dispersion et non de l'action anthropique, l'espèce n'étant pas favorisée dans les recommandations culturelles. Ces observations permettent d'obtenir des données « très grossières » sur les capacités de dispersion naturelle. Les valeurs obtenues (30m/an) sont très largement inférieures à celles relatives à la migration naturelle postglaciaire (500m/an) et à celles nécessaires pour « suivre » les déplacements de niches écologiques prédites dans le cadre de changement climatique (1 à 5 km/an). (Source : Delzon S. et al, 2013)

Que peut-on dire des capacités d'adaptation future ?

Les réponses à cette question sont moins affirmatives. Les incertitudes sont en effet de deux ordres :

i) L'absence de recul et de données sur les taux d'évolution (par unité de temps) des arbres.

Autant l'histoire au cours de l'holocène nous montre que les populations ont évolué génétiquement en fonction des pressions sélectives locales, générées entre autres par les facteurs climatiques (fig.2), autant la vitesse à laquelle cette évolution s'est faite demeure encore très largement inconnue. Des observations indirectes et partielles sont cependant disponibles et sont issues de connaissances précises de l'histoire récente de certaines populations ou espèces. C'est le cas des espèces exotiques (notamment nord américaines) qui ont été introduites en Europe au cours des deux derniers siècles. A chaque fois que les populations introduites ont été comparées aux populations sources –toujours présentes dans

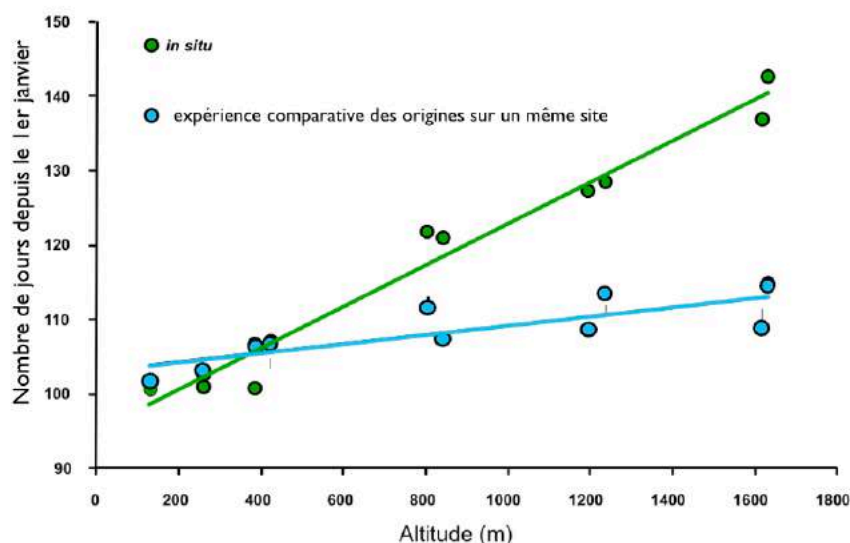


Figure 2. Variation de la date de débournement du chêne sessile dans deux vallées pyrénéennes. Mise en évidence de l'adaptation de la phénologie le long de gradient de température.

Cette figure représente les variations de la date de débournement du chêne sessile (en axe des Y : jours juliens) en fonction de l'altitude d'origine des arbres. La droite verte (points verts) représente les observations faites in situ, en forêt. La droite bleue (points bleus) représente les variations observées sur des plants issus des mêmes forêts mais transférés en un même lieu, en test comparatif, situé à basse altitude. Dans ce dernier cas, comme les plants sont installés en milieu commun, les différences observées sont exclusivement attribuées à des différences d'origine génétique. Les deux droites observent une pente positive : les populations de basse altitude (températures plus chaudes) débourrent plus tôt que les populations de haute altitude (températures plus froides). Ces différences peuvent être exprimées en termes de température : un réchauffement d'un degré Celsius correspond à un décalage de 7 jours de la date de débournement (droite verte). La sélection naturelle le long du gradient altitudinal a contribué à cette adaptation, puisque les différences génétiques entre populations (droite bleue) représente un décalage moyen de 1 jour/ 1°C. Il y a donc eu adaptation en réponse à la sélection divergente générée par le gradient de température. On constatera également que la plasticité (différence entre la droite bleue et la droite verte) joue un rôle très important dans la réponse adaptative des arbres. (Source : Kremer et al., 2014)

l'aire naturelle- on a pu noter des divergences génétiques significatives notamment pour des caractères de phénologie ou de croissance. Il y a donc effectivement eu évolution sur des pas de temps relativement courts, mais on ne peut pas toujours attribuer cette évolution à une sélection naturelle conduisant à une meilleure adaptation. D'autres mécanismes liés notamment au transfert de population (dérive génétique, effet de fondation) ont également pu contribuer à l'évolution.

ii) La seconde incertitude vient de l'appréciation très partielle de l'adaptation, que les protocoles expérimentaux et scientifiques permettent d'obtenir actuellement sur les arbres. La valeur adaptative d'un arbre est une notion très globale qui intègre un grand nombre de caractères et propriétés, dont un nombre limité peut être raisonnablement appréhendé dans les dispositifs de recherche. A titre d'exemple, si l'on peut se prononcer sur les modifications de croissance ou de date de débournement engendrées en moyenne par des changements de température ou de précipitation, il est par contre plus difficile de se prononcer sur les modifications induites sur la reproduction ou sur les communautés d'insectes ou de pathogènes associées, qui sont autant de composantes contribuant à la valeur adaptative de l'arbre.

Si l'expérimentation ne peut répondre qu'imparfaitement à la question de l'adaptation, la théorie offre des arguments généralement plus optimistes, qui permettent d'ailleurs d'expliquer l'évolution rapide des espèces introduites. Les arguments théoriques s'inspirent de la disponibilité d'une très grande diversité génétique, qui est le vrai combustible alimentant l'évolution. Cette diversité est par ailleurs constamment maintenue par les échanges de flux de gènes généralement massifs et à longue distance (dispersion du pollen). Au-delà du maintien d'une diversité élevée, les flux de pollen peuvent également contribuer à une « accélération » de l'adaptation, notamment dans le cas où ces flux vont dans la même direction que le changement climatique. Concrètement, les mouvements de pollen du Sud vers le Nord peuvent transférer des gènes conférant une meilleure adaptation à la sécheresse aux populations situées au Nord.

Quels autres mécanismes peuvent contribuer à une réponse adaptative des arbres ?

L'adaptation résultant de modifications de composition génétique des populations consécutives à une sélection naturelle ne peut se réaliser que sur plusieurs générations. Le changement de composition génétique peut être important en une seule génération si la sélection s'exerce sur une population ayant une grande diversité génétique. Ces changements sont héréditaires et peuvent par la suite s'accumuler sur plusieurs générations. Au-delà de ces changements transmissibles de génération en génération, des modifications phénotypiques non contrôlées par des gènes peuvent également permettre aux arbres de répondre à des crises environnementales. Elles sont plus « rapides » mais non transmissibles. C'est ce qu'on appelle la plasticité (fig.2). On sait expérimentalement que la plasticité de caractères liées à la valeur adaptative, comme la croissance, la phénologie, la reproduction est importante chez les arbres forestiers. On a tout particulièrement pu la mettre en évidence dans des plantations clonales, où des arbres clonés (de même génotype) ont pu être plantés dans des milieux différents.

Il est enfin pertinent de mentionner le rôle évolutif que risque de jouer l'hybridation interspécifique dans le futur. La plupart des espèces présentes dans les régions tempérées européennes, ont des espèces apparentées (appartenant au même genre) en région méditerranéenne, avec lesquelles elles ont maintenu la capacité de se croiser (fig.3). Par ailleurs les contacts entre espèces méditerranéennes et tempérées auront tendance à être plus fréquents dans les prochaines décennies, suite à la migration stimulée par le changement climatique. A l'instar des contacts interspécifiques qui ont été restaurés lors du dernier réchauffement postglaciaire, on peut donc raisonnablement anticiper sur des



Figure 3. *Abies pinsapo var. pinsapo* dans la Sierra Bermeja (Espagne du sud) - Source : EUFORGEN

recombinaisons génétiques originales dont certaines pourront contribuer à une adaptation aux nouvelles conditions de milieu générées par le changement climatique.

Ce qu'il faut retenir

- Pour les espèces forestières, le défi évolutif face au CC se résume à ; migrer ou s'adapter
- L'histoire de l'évolution des espèces après les dernières glaciations peut éclairer les questionnements sur les évolutions à venir en réponse au CC
- Les capacités de migration des espèces vont se heurter à la vitesse du CC
- Les capacités d'adaptation des espèces sont incertaines
- D'autres mécanismes peuvent contribuer à une réponse adaptative des arbres

Recommandation : la lecture de cette fiche peut être complétée utilement par celle des fiches 6.07

Pour faire face au changement climatique : atténuation ou adaptation ?

Face au changement climatique (CC) et ses impacts indésirables sur les écosystèmes et la société, deux voies d'actions sont possibles : soit en agissant directement sur les facteurs anthropiques responsables du CC afin de l'atténuer, soit en adaptant les socio-écosystèmes pour réduire ses impacts. Atténuer le CC revient à réduire les émissions de gaz à effet de serre et à augmenter le stockage du carbone. Adapter les socio-écosystèmes revient à agir sur eux pour réduire leur exposition aux risques et leur vulnérabilité. Quelles voies faut-il privilégier ? Comment ces choix se traduisent-ils en termes de politiques pour le secteur forêt-bois ?

Atténuation du - et adaptation au - changement climatique : quels concepts ?

La figure 1 présente une vision intégrée des concepts d'atténuation et d'adaptation. Les voies de développement socio-économique génèrent l'émission de gaz à effet de serre (GES) dont la concentration dans l'atmosphère est responsable du réchauffement de la planète et des changements climatiques induits (cf. fiche 6.01 dans ce même chapitre) : augmentation de la température, élévation du niveau de la mer, modifications du régime des précipitations, amplification de phénomènes extrêmes. Ces changements ont une incidence plus ou moins forte sur les écosystèmes naturels océaniques ou terrestres, en termes de composition (biodiversité) et de fonctionnement, ainsi que sur les ressources alimentaires (agriculture) et hydriques. Ils ont également un impact variable sur les infrastructures (habitat, transport, etc.) ainsi que sur la santé humaine. À leur tour, ces impacts peuvent affecter les voies de développement socio-économique. Dans un premier temps, les informations scientifiques disponibles permettaient surtout d'établir ces corrélations dans le sens des aiguilles d'une montre (cf. fig.1), c'est-à-dire de déterminer les changements climatiques et leurs incidences à partir des données socioéconomiques et des émissions. Une meilleure connaissance de ces corrélations permet aujourd'hui de les évaluer dans le sens contraire des aiguilles d'une montre, autrement dit de définir des voies de développement possibles et des limitations des émissions globales susceptibles de réduire le risque d'incidences futures indésirables.

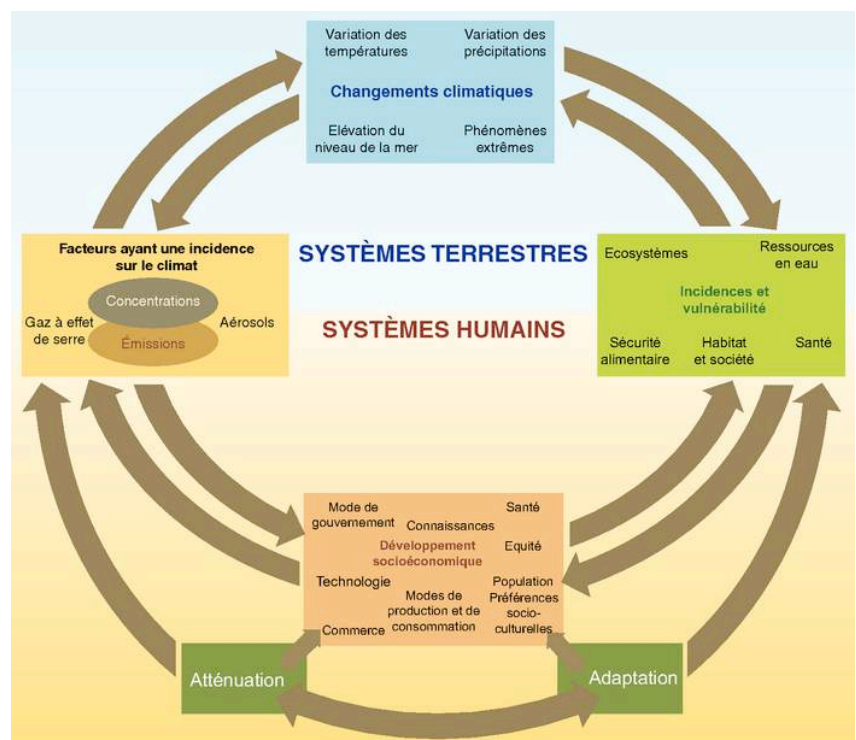


Figure 1. Représentation des facteurs humains de l'évolution du climat, des effets du changement climatique et des réponses apportées, ainsi que de leurs corrélations. (Source : GIEC, 2007)

Les **réponses** qu'il est possible d'apporter pour contrecarrer le CC et limiter ses impacts (fig. 1) sont de deux ordres :

1. **L'atténuation** de ce changement en agissant directement sur ses causes.

Il s'agit essentiellement de réduire les émissions de gaz à effet de serre (GES) d'origine anthropique et leur concentration dans l'atmosphère grâce à une batterie de mesures : i) réduction de l'utilisation de carburants d'origine fossile grâce au développement des énergies renouvelables ; ii) utilisation accrue des matériaux et matières premières à faible « empreinte carbone » en substitution à d'autres plus gourmands en énergie d'origine fossile ; iii) ralentissement de la déforestation dans les régions tropicales ; iv) amélioration des pratiques agricoles ; v) aménagement du territoire (transports, modes d'habitat) ; vi) accroissement du stockage du carbone dans les écosystèmes ; vi) développement des techniques de géo-ingénierie du stockage du carbone, etc. L'ensemble de ces mesures peut contribuer à réduire les **aléas** liés aux évolutions tendancielles (réchauffement) et aux phénomènes extrêmes (canicules, vagues de sécheresse, inondations, etc.)

2. **L'adaptation** des écosystèmes et des systèmes humains au changement climatique et à ses impacts.

L'adaptation est une **démarche d'ajustement** au climat actuel ou attendu, ainsi qu'à ses conséquences. Dans les systèmes humains, il s'agit d'atténuer ou d'éviter les effets préjudiciables et d'exploiter les effets bénéfiques. Dans certains systèmes peu anthropisés, l'intervention humaine peut faciliter l'adaptation au climat attendu ainsi qu'à ses conséquences. L'objectif général est de limiter les **risques** encourus par les socio-écosystèmes du fait des incidences du changement climatique en réduisant leur **exposition** au risque (dans l'espace et dans le temps) et leur **vulnérabilité**, et en améliorant leur **résilience** (fig.2). Par exposition, on entend la présence de personnes, de moyens de subsistance, d'espèces ou d'écosystèmes, de fonctions, ressources ou services environnementaux, d'éléments d'infrastructure ou de biens économiques, sociaux ou culturels dans un lieu ou dans un contexte susceptibles de subir des dommages. Ainsi, on peut s'adapter au risque d'inondation par des

équipements hydrauliques appropriés (barrages, zones d'expansion des crues, digues, etc.), ou encore aux canicules en climatisant les résidences de personnes âgées. Par vulnérabilité, on entend la propension ou prédisposition de systèmes de toute nature à subir des dommages, qu'ils aient ou non une valeur économique. La vulnérabilité englobe divers concepts ou éléments, notamment les notions de sensibilité ou de fragilité, et l'incapacité de faire face et de s'adapter (manque de résilience). Ainsi, l'agriculture peut s'adapter à de nouvelles conditions grâce à la sélection ou à l'irrigation qui permettent de réduire la vulnérabilité à la sécheresse de certaines productions végétales.

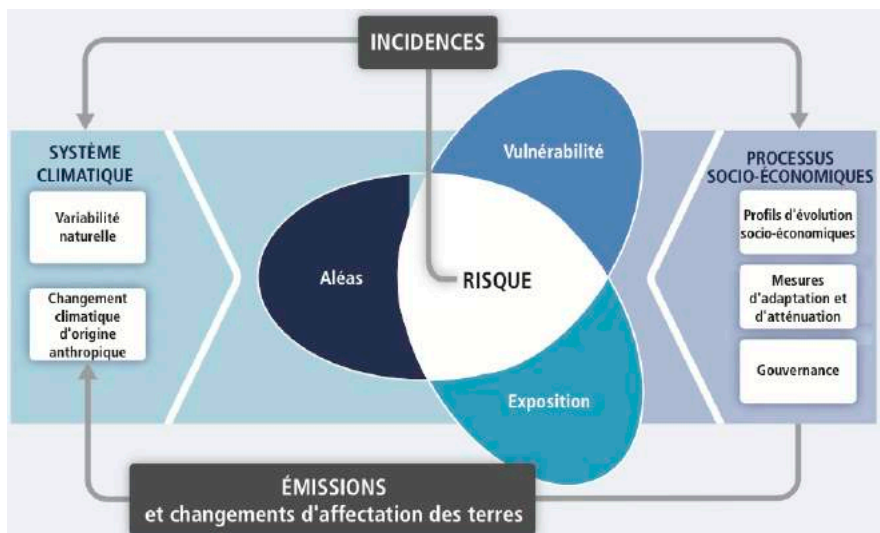


Figure 2. Une vision intégrée du risque lié au système climatique et aux processus socio-économiques - Le risque d'incidences liées au climat découle de l'interaction entre des aléas climatiques (y compris les tendances et les phénomènes dangereux) et la vulnérabilité et l'exposition des systèmes anthropiques et naturels. Les changements qui touchent à la fois le système climatique (à gauche) et les processus socio-économiques, y compris l'adaptation et l'atténuation (à droite), sont les principales causes des aléas, de l'exposition et de la vulnérabilité. Source : GIEC, 2014

Quelles voies faut-il privilégier : atténuation ou adaptation ?

On peut remarquer que les **réponses liées à l'atténuation** (même mises en œuvre localement) se traduisent par des effets à l'**échelle planétaire** puisque les GES se dispersent dans l'atmosphère, et que ces effets ne se feront sentir que dans un **cadre temporel à moyen et long terme**, compte tenu de l'inertie du système terre et de sa «machinerie climatique». Pour autant, l'atténuation demeure indispensable pour éviter l'emballement irréversible de cette machinerie qui conduirait alors à rendre inopérantes les mesures d'adaptation. De nombreux experts estiment aujourd'hui qu'il sera difficile de rester sous la «barre critique des 2 °C», ce qui conduit à penser que l'atténuation seule n'est pas suffisante et qu'il faut aussi recourir à l'adaptation pour limiter les impacts du CC à un niveau acceptable. Les **réponses liées à l'adaptation** des socio-écosystèmes concernent, quant à elles, essentiellement des objectifs à l'**échelle locale ou régionale** ; en outre, elles se traduisent par des effets qui se feront sentir dans un **cadre temporel à court et moyen terme**. En affinant l'analyse comparative de l'atténuation du - et de l'adaptation au- changement climatique pour contrer ses impacts, on peut faire ressortir les points suivants : i) adaptation et atténuation agissent aux deux extrémités de la chaîne causale reliant émissions, concentrations et impacts , et sont aussi interdépendantes (fig.1) ; ii) si les mesures d'atténuation peuvent se mesurer par un indicateur unique (quantité d'émissions évitées), ce n'est pas le cas des mesures d'adaptation dont les indicateurs sont multiples et non comparables ce qui rend difficile l'allocation des moyens publics consacrés à ces deux types d'action ; iii) l'atténuation fournit un bien public planétaire (la qualité du climat), alors que l'adaptation fournit en général un bien privé ou un bien public local. A priori, la mise en œuvre de moyens financiers publics semblerait donc plus légitime dans le premier cas que dans le second. Pour autant, il existe de nombreuses situations dans lesquelles l'intervention publique en soutien de l'adaptation est nécessaire.

La conclusion est que atténuation et adaptation sont complémentaires, et il faut les combiner dans une perspective intégrée, optimisant l'utilisation des ressources et des capacités, en fonction des données planétaires et des contextes régionaux et locaux. Les efforts d'atténuation et d'adaptation ont un coût, et certaines impasses devront être faites. Mais ces dommages résiduels seront d'autant plus faibles que les efforts consentis seront significatifs et précoces. Pour les politiques climatiques, l'enjeu est de déterminer le compromis raisonnable entre atténuation, adaptation et dommages résiduels. Source : F. Lecoq, 2009

Une politique d'adaptation pertinente : le dispositif français «trame verte et bleue»

À l'image de ce réseau bocager breton connectant parties boisées et bosquets, la **trame verte et bleue** est un réseau formé de continuités écologiques terrestres et aquatiques. Elle constitue un outil d'aménagement durable du territoire et contribue à un état de conservation favorable des habitats naturels et des espèces et au bon état



Figure 3. Maillage bocager breton
crédit photo : Marc RAPILLIARD

écologique des masses d'eau, dans un contexte de changement climatique et de fragmentation des habitats. Les continuités écologiques qui constituent la trame verte et bleue comprennent des réservoirs de biodiversité et des corridors écologiques. Leur identification et leur délimitation doivent notamment permettre aux espèces animales et végétales dont la préservation ou la remise en bon état constitue un enjeu national ou régional de se déplacer pour assurer leur cycle de vie et favoriser leur capacité d'adaptation. Ces continuités écologiques sont identifiées par les schémas régionaux de cohérence écologique, élaborés conjointement par les présidents de conseils régionaux et les préfets de région. Pour autant, ce système connecté n'est pas la panacée : les corridors ainsi formés sont également des voies possibles de migration pour des populations d'espèces animales, végétales ou de microorganismes non désirés.

Un objectif d'importance planétaire : ralentir la déforestation tropicale pour réduire l'émission de GES et atténuer le CC ; les programmes internationaux REDD+ et FLEGT

Au cours des dernières décennies, la déforestation et la dégradation des forêts ont été très marquées, particulièrement sous les tropiques (fig. 3). C'est le résultat de nombreux facteurs, dont l'exploitation (légale ou non), la conversion pour une agriculture à grande échelle, l'agriculture itinérante de subsistance par les populations rurales pauvres, l'activité minière et la collecte de bois de chauffage. La disparition de ces forêts soulève des inquiétudes nombreuses (perte de biodiversité, impacts sur la vie rurale, dégradation des services écosystémiques...) mais il y a depuis peu un intérêt plus particulièrement centré sur les **liens entre la disparition des forêts et le changement climatique**. Des initiatives ambitieuses ont été engagées par les instances internationales (Nations-Unies, Banque mondiale, Union Européenne, etc.) à travers les programmes **REDD+** et **FLEGT**.

REDD+ désigne les démarches concrètes engagées et les incitations positives mises en place pour **Réduire** les Emissions liées à la **Déforestation** et à la **Dégradation** des forêts et favoriser la conservation et le renforcement des stocks de carbone forestier existants, ainsi que la gestion forestière durable dans les pays en développement. C'est un processus multilatéral encadré par les négociations internationales sur le climat (**COP**) et qui vise à combattre tous les facteurs de la déforestation, qu'ils soient internes ou externes à la filière forêt-bois. **FLEGT** (**F**orest **L**aw **E**nforcement, **G**overnance and **T**rade) signifie application des réglementations forestières, gouvernance et échanges commerciaux. Ce plan FLEGT est une initiative lancée par l'UE en 2003 pour prévenir les impacts négatifs de l'exploitation forestière et du commerce de bois illégaux. Sa finalité est d'améliorer la gouvernance et de réduire l'exploitation forestière illégale, en renforçant la gestion légale des forêts, et en favorisant le commerce de bois d'origine légale. Les mesures du Plan d'action sont destinées à augmenter tant la demande que l'offre de bois légal.

Les deux initiatives mobilisent des fonds provenant d'instances internationales et de pays donateurs individuels pour aider les pays en développement à s'engager dans la maîtrise d'une gestion forestière véritablement durable. Elles agissent de façon synergique dans plusieurs pays.

Source : European Forest Institute



Figure 4. La déforestation au Brésil résulte pour une bonne part de politiques favorisant le développement de l'élevage (ranching) comme ici près de Rio Branco (Acre) - Source : CIFOR

Ce qu'il faut retenir

- Face au CC et à ses impacts, deux voies sont possibles
- L'atténuation consiste à agir pour freiner les émissions de GES
- L'adaptation consiste à ajuster les socio-écosystèmes pour réduire les risques liés aux impacts du CC
- Ces deux voies concernent des échelles temporelles et spatiales différentes et doivent être envisagées en synergie : nombre de pays dont la France développent de telles politiques
- La communauté internationale et l'ONU (conventions COP) mettent en place des mécanismes dans ce sens et aident financièrement les pays du Sud à les mettre en œuvre

La présente fiche décrit et illustre les concepts d'atténuation et d'adaptation. Sa lecture peut être utilement complétée par celle des trois suivantes, centrés sur le secteur forêt-bois, et qui abordent : i) le rôle de ce secteur pour atténuer le changement climatique ; ii) le potentiel de stockage du carbone dans les produits à base de bois, et comment le bois et ses dérivés peuvent se substituer à d'autres matériaux et autres sources d'énergie ; iii) les stratégies envisageables pour aider les forêts à s'adapter au CC.

Atténuer le changement climatique : quel rôle pour le secteur forêt-bois ?

Le changement climatique (CC) est fortement lié aux émissions d'origine anthropique de gaz à effet de serre (GES), notamment de dioxyde de carbone CO₂. Atténuer ce changement, revient à réduire les émissions de CO₂ et augmenter le stockage du carbone. Comment ce principe se décline-t-il en forêt et vis-à-vis des utilisations du bois ? Quelles sont les options possibles ? Quelle est la contribution du secteur français forêt-bois à l'atténuation du changement climatique ?

Quels sont les flux de carbone dans le secteur forêt-bois ?

Le cycle du carbone peut être appréhendé à différentes échelles : planétaire, nationale, ou tout simplement d'une forêt. Nous savons que les arbres et les plantes absorbent le carbone de l'air par photosynthèse, le fixent dans leurs tissus où il est retenu ; une partie de ce carbone retourne toutefois à l'atmosphère par respiration (flèche rouge pointillée en fig.1). Quand ces arbres et plantes meurent, ils se retrouvent sous des formes diverses : la végétation morte sur pied, le bois mort au sol et la litière, qui de façon ultime, contribue largement à la matière organique du sol. Dans une forêt exploitée, une partie de cette végétation (les arbres) est récoltée. Les résidus d'exploitation (cimes, branches) laissés à terre rejoignent le compartiment bois-mort au sol et litière. Le bois récolté est transformé en produits forestiers qui, à la fin de leur vie, sont envoyés en décharge ou brûlés pour l'énergie (flèche brune pointillée en fig.1). Tous ces compartiments peuvent aussi être des sources de C qui retourne vers l'atmosphère par décomposition ou combustion. Le temps de résidence du carbone dans ces compartiments est variable et peut être modulé par la gestion. Le schéma conceptuel présenté dans la figure 1 peut aussi être appliqué à l'échelle de la filière forêt-bois d'un pays. Surtout, il doit être conçu en interaction avec les autres milieux et activités : les occupations du sol, par rapport auxquelles la forêt peut gagner ou perdre du terrain, et les utilisations de matériaux ou énergies qui sont en concurrence avec le bois. **Pour la filière forêt-bois, atténuer le changement climatique, c'est donc prendre en compte à la fois l'évolution des stocks de carbone forestier (sous l'effet du fonctionnement naturel des écosystèmes, de la gestion forestière et des changements d'occupation du sol) et la réduction possible des émissions (dans les secteurs industriels et énergétiques).**

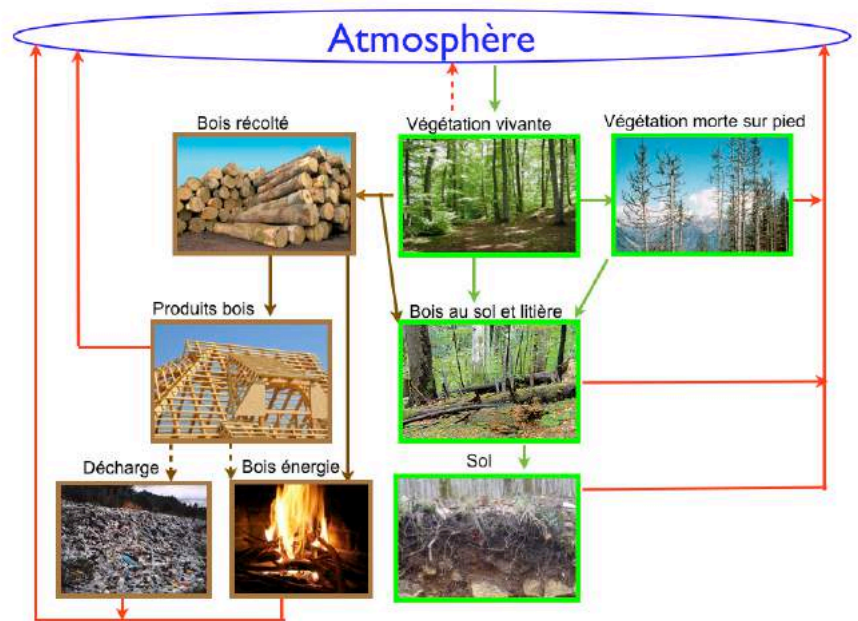


Figure 1. Le cycle du carbone dans le secteur forêt-bois (d'après Heath et al., 2009) chaque compartiment correspond à un stock; les flèches à des flux- en vert, C fixé ; rouge, C émis ; brun, C du bois.

L'atténuation du CC : quelles options pour la forêt et ses produits ?

L'atténuation du changement climatique passe notamment par la lutte contre l'effet de serre qui vise à réduire les sources de GES et augmenter leurs puits de manière à limiter leur concentration dans l'atmosphère. Trois options, que l'on peut combiner, sont disponibles : **éviter des émissions**, de carbone forestier, **stockage dans les forêts ou leurs produits**, **substitution** du bois à d'autres matériaux ou sources d'énergie à plus forte « empreinte » carbone. L'**éviter des émissions** de carbone forestier s'efforce de freiner le transfert de GES vers l'atmosphère. Il s'agit en particulier de prévenir : la déforestation et la dégradation des forêts (principalement dans les régions tropicales), et, à une échelle régionale et locale, les incendies de forêt ou la vulnérabilité aux risques (tempêtes, sécheresse, insectes, maladies). On sait en effet que les forêts stockent une grande quantité de carbone (avec toutefois des différences écorégionales), beaucoup plus que d'autres écosystèmes, prairies ou cultures agricoles. Partout où l'on peut maintenir l'état boisé, on maintient la capacité de la forêt à séquestrer du carbone dans le futur. Cet éviter des émissions peut également être obtenu par des mesures de gestion forestière telles que le maintien, autant que faire se peut, du carbone organique du sol par une sylviculture à couvert continu.

La séquestration de carbone par une gestion spécifique peut être envisagée. Un premier exemple concerne le stockage en forêt. Dans une vision ou court terme, le sylviculteur peut augmenter l'âge d'exploitabilité des arbres, réduire le niveau des récoltes, etc. Mais cette approche a de réelles limites dans une vision à plus long terme : elle augmente la vulnérabilité aux risques de la forêt ; elle conduit à terme à une mortalité naturelle élevée des arbres et à une moindre croissance des peuplements ; elle limite la valorisation économique du bois, qui est une ressource renouvelable, et induit par contrecoup un recours accru à des ressources qui ne le sont pas. En France, où la récolte de bois annuelle est très inférieure à l'accroissement biologique (voir fiche 7.04), le stock de C en forêt augmente régulièrement d'environ 100 millions de tonnes CO₂ équivalent par an (biomasse vivante ou morte et matière organique du sol comprises), atteignant ainsi des niveaux élevés. Un second exemple est le boisement (ou reboisement) où l'on s'efforce de convertir à la forêt des terres devenues marginales pour l'agriculture ou l'élevage. De nombreuses autres mesures sont possibles, notamment celles qui concernent la croissance des arbres et des peuplements. Ce sont des méthodes sylvicoles connues consistant à accroître la productivité forestière grâce au contrôle de la végétation concurrente, à la fertilisation, ou à l'utilisation de variétés forestières génétiquement améliorées pour les essences qui sont plantées. Mais on peut aussi séquestrer le carbone dans les produits à base de bois (construction, ameublement, emballage, papier et carton, etc.). Naturellement, l'efficacité de cette séquestration dépend de la durée de vie des produits et du recyclage qui en est fait. En toute fin de vie, ces produits vont aller en décharge où ils se décomposeront lentement pendant un temps plus long qu'à l'air libre. Mais la majorité d'entre eux sont destinés à la bio-énergie (utilisation en cascade). Le tableau 2 précise pour différents types de produits cette durée de vie ainsi que le stock d'équivalent CO₂ généré et son évolution annuelle en France. Le stock dépassait 300 millions de tonnes de CO₂ en 2005 et s'accroissait annuellement de 1% environ.

	Stock (MtCO ₂)	Variation de stock (MtCO ₂)	Durée de vie typique
Construction	173,5	2,6	15 - 75 ans
dont charpente			75 ans
dont menuiserie			20 ans
Papier-carton	22,7	-0,2	1 - 16 mois
Meuble	57,6	0,2	5 - 25 ans
Emballage	12,0	0,4	1 mois - 8 ans
Bois énergie	47,0	0,1	1 mois - 2 ans
Total	312,8	3,1	

Tableau 1. Durée de vie, stocks actuels de CO₂ et leurs variations annuelles pour différents types de produit à base de bois en France - Source FCBA pour l'année 2005

La troisième option pour atténuer le CC est la **substitution**. Il s'agit d'**utiliser l'énergie ou les produits issus de la biomasse forestière et du bois pour remplacer des combustibles fossiles, ou d'autres matériaux** dont la production est plus coûteuse en énergie fossile. L'**énergie à base de bois**, peut être

utilisée pour la chaleur, l'électricité, (ou les deux) ou comme carburant pour le transport (encore en développement). (voir également fiches 3.08, 7.05, 7.06 et 7.07 pour plus de détails).

Les **produits à base de bois** sont faciles à mettre en oeuvre et présentent un bilan carbone souvent très favorable par rapport à d'autres matériaux. À titre d'exemple, la figure 3 compare trois maisons construites avec trois matériaux, le béton, l'acier et le bois mais dont l'un est dominant. La maison en bois est celle qui combine tous les avantages. Elle utilise le moins d'énergie non renouvelable sur l'ensemble de son cycle de vie, pour sa création, sa construction et sa maintenance. Elle est aussi la plus économe en fonctionnement en termes de consommation énergétique. Dans le domaine de la construction, les occasions de substituer les produits bois à d'autres matériaux sont donc réelles.

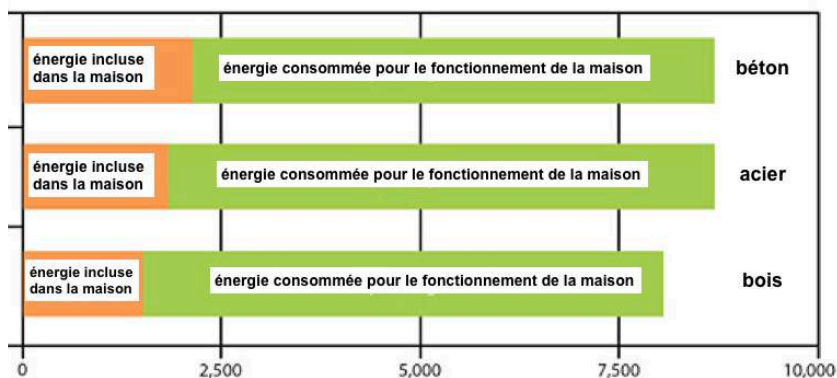


Figure 2. *Énergie primaire (en GJ) non renouvelable incorporée dans la construction et la maintenance de 3 types de maison où le matériau prédominant est le béton, l'acier ou le bois, et énergie consommée par leur fonctionnement au cours de la durée de leur vie.* Source: Architectural Record, 2013

http://continuingeducation.construction.com/article_print.php?

L'atténuation du CC et le secteur forêt-bois : prendre en compte la complexité

La présentation ci-dessus des trois options offertes par le secteur forêt-bois pour atténuer le CC est, pour des raisons pédagogiques, volontairement simplifiée. Mais la réalité est plus complexe. Tout d'abord, la gestion forestière est spécifique de certains types de forêts et écosystèmes, de particularités locales et d'objectifs de gestion différents : elle nécessite donc de nombreux ajustements ; il est alors difficile d'énoncer des lois générales en matière de gestion optimale de l'atténuation du changement climatique par la forêt et le bois.

Il faut aussi considérer la notion d'échelles spatiale et temporelle, et leurs différents niveaux, tout au long du cycle de la forêt et de ses produits. Au niveau spatial, les choses se présentent différemment selon que l'on considère quelques ares de forêt, un peuplement, un massif forestier, etc. Au niveau temporel, l'analyse que l'on peut faire d'une récolte de bois ou d'autres activités à court terme, peut être différente lorsqu'on se place sur une période de 50 à 100 ans. Ainsi, un certain déstockage du carbone forestier par des récoltes additionnelles pour une utilisation accrue du bois, peut avoir à court terme un bilan «émission de CO₂» défavorable, mais la situation peut s'inverser ensuite et, entre temps, on aura généré un surplus d'activité économique, évité d'utiliser des ressources non renouvelables, prévenu les risques en forêt et renforcé la capacité ultérieure de stockage. La question se pose donc de savoir s'il vaut mieux un bilan favorable aujourd'hui ou plus tard et, dans ce dernier cas, comment assurer au mieux la transition.

Dans ce domaine, l'application pratique de certains principes n'est pas évidente comme en témoigne la notion controversée de neutralité carbone. Elle a été introduite au départ pour éviter de comptabiliser deux fois les émissions engendrées par le bois énergie : ces dernières ne sont pas prises en compte en sortie de cheminée et qualifiées de « neutres » parce qu'il a été choisi par ailleurs, pour simplifier, de considérer le carbone rendu à l'atmosphère dès que le bois est prélevé en forêt. Mais ce qui est au départ une facilité tend à laisser croire qu'on peut brûler autant de bois qu'on le souhaite puisque cette ressource naturelle est renouvelable. Ce qui n'est pas le cas.

Il est important mais délicat d'évaluer les émissions de GES évitées par la substitution du bois à d'autres d'énergies ou matériaux. Les analyses de cycle de vie de produits procurant les mêmes fonctionnalités à partir de ressources différentes en fournissent une mesure. Mais celle-ci dépend largement des produits considérés, du processus de production et du contexte dans lequel ces produits sont fabriqués puis utilisés. On se réfère donc à des valeurs moyennes telles que celles mentionnées par l'ADEME dans son avis de juin 2015 : l'utilisation de bois évite des émissions de GES de l'ordre de 0,5 tonnes de CO₂ par mètre cube de bois énergie et 1,1 tonnes de CO₂ par mètre cube de bois contenu dans des produits (hors valorisation énergétique éventuelle en fin de vie ou des co-produits).

La filière forêt-bois française : quelle capacité d'atténuation ?

Les émissions annuelles françaises de GES sont aujourd'hui de l'ordre de 500 millions de tonnes (éq. CO₂). En considérant le schéma de la figure 1 à l'échelle du secteur forêt-bois français, on a pu estimer les stocks de chaque compartiment et les flux entrants ou sortants, et proposer ainsi une vision globale de la capacité du secteur d'atténuer ces émissions (cf. tableau 4). Environ 96 millions de tonnes d'équivalent CO₂ viennent annuellement s'ajouter au stock de carbone en forêt, tandis que le **bois en substitution à d'autres matériaux et sources d'énergie** permet de ne pas émettre 34 millions de tonnes (éq. CO₂). Au total, **la capacité d'atténuation du secteur est d'environ 25 % des émissions françaises annuelles de GES**. Malgré les incertitudes sur ces estimations, leur interprétation permet de proposer des pistes pour améliorer la gestion du carbone et l'atténuation du CC pour ce qui concerne la forêt et la filière (cf. encadré ci-dessous).

Évolution du stock de carbone	
dans les arbres	71
des bois morts	10
du sol	15
dans les produits bois	€
Émissions évitées	
matériau	16
énergie	18
Total	130

Tableau 2. Bilan des flux annuels de C en MtCO₂ eq/an dans la filière française forêt-bois Source : IGD 2015, IGN

Les voies de progrès possibles

- préserver le carbone du sol par la gestion forestière
- dans les forêts matures, favoriser la stockage de carbone si les risques sont limités et la production ligneuse non prioritaire
- apprécier la vitalité de la forêt, prévenir les risques et réduire la vulnérabilité (tempêtes, sécheresses, incendies, insectes, pathogènes...) ; des éclaircies précoces et régulières ainsi qu'un âge d'exploitabilité pas trop élevé font partie des solutions
- favoriser le renouvellement des peuplements pour soutenir la séquestration de carbone à moyen terme
- au delà du CO₂, considérer les effets du couvert forestier sur le climat (cycle de l'eau, flux d'énergie) et d'autres GES éventuels (méthane, ozone...)
- inscrire l'atténuation du CC dans la gestion durable des forêts
- approfondir les avantages du bois par rapport aux autres matériaux et sources d'énergies
- accroître le prélèvement de bois en forêt de production et les utilisations du bois en substitution d'autres matériaux et énergies ; le faire progressivement pour développer la capacité d'atténuation à moyen terme sans la dégrader à court terme
- intégrer les conditions économiques relatives à la gestion forestière, aux marchés et industries du bois
- développer une vision intégrée (atténuation et adaptation) du CC pour la forêt et le secteur forestier
- au niveau d'un pays, promouvoir des projections dans le temps du bilan général et complet du carbone dans le secteur forêt-bois, sous différents scénarios de CC et de gestion.
- au niveau d'un projet, encourager des stratégies d'atténuation du CC intégrant la forêt et le bois.

Ce qu'il faut retenir

- La contribution du secteur forêt-bois à l'atténuation du CC à est importante à travers la séquestration en forêt et dans les produits, et la substitution (énergie et matériaux) ; elle peut être augmentée dans le futur le futur
- Les gestionnaires forestiers doivent progressivement intégrer l'idée que l'atténuation doit trouver sa place parmi les autres objectifs de la gestion durable. Prendre en compte le carbone parmi ces objectifs peut aider à engager des stratégies de gestion solidement fondées et plus globales.

La lecture de cette fiche peut être complétée utilement par celle des fiches 2.02, 3.08, 5.01, 6.01, 6.02

Les produits à base de bois : combien de carbone stockent-ils et quelle est leur empreinte carbone ?

Par la photosynthèse, le CO₂ de l'atmosphère est capté par les arbres pour produire l'ensemble des constituants organiques du bois. Ce mécanisme est à l'origine de la fonction « puits de carbone » des forêts en croissance. On estime que le carbone inclus dans un m³ de bois représente de l'ordre d'une tonne de CO₂ capté depuis l'atmosphère. Cette quantité de CO₂ capté par les arbres peut rester stockée dans des produits bois (papiers, panneaux, sciages, emballages, charpentes, menuiseries, meubles,...) pendant des durées significatives couvrant leur fabrication et leur utilisation (durée de vie). Pour les produits de construction cette durée peut aller de 20 jusqu'à 100 ans. Que représentent en France les quantités totales de carbone stockées dans les produits à base de bois et les flux qui leur sont liés et quelle est leur « empreinte carbone » ?

Le stockage à l'échelle du territoire

Le stockage en forêt

Les bilans d'émissions-captations de GES (gaz à effet de serre) du système forêt-bois se font à l'échelle nationale, notamment dans le cadre de la Convention Climat des Nations Unies (UNFCCC) et du Protocole de Kyoto. Ils peuvent bien entendu également se faire à l'échelle d'une région ou d'un territoire dans le cadre d'un projet forestier. La forêt Française est à ce titre un puits de carbone important avec un flux physique net de captation de l'ordre de 70 Mt eq. CO₂ (CITEPA 2014) et en constante progression depuis 1990 (+80 % de 1990 à 2007).

Le stockage dans les produits bois

Selon les lignes directrices du GIEC (Groupe International d'Experts sur le Climat), les produits ligneux sont considérés comme un réservoir de carbone. À ce titre, si sur une période d'analyse, ce réservoir augmente, il constitue également un puits de carbone sur cette période. Parce qu'ils prolongent le stockage de carbone forestier, parce que l'augmentation de la quantité de produits bois sur le marché ou l'augmentation de leur durée de vie conduit à un accroissement du stock de CO₂ biomasse, les produits bois peuvent donc également constituer un puits de carbone (fig.1).

Afin d'évaluer l'ampleur de ce puits, il est nécessaire de prendre en compte les flux entrants, à savoir les quantités de produits bois récoltés en forêt et entrant dans les stocks de production, les stocks de produits présents sur le marché, les stocks de produits sortants, c'est-à-dire ceux devenus déchets et valorisés en énergie ou éliminés. Le GIEC a publié en 2013 un rapport précisant notamment les modalités d'évaluation de ce puits à l'échelle d'un pays.

Figure 1. Stock de C (en CO₂) dans une maison à ossature bois (Source : FCBA, 2008 ; données 2005) - Un développement de la construction bois peut contribuer significativement à accroître le stockage du carbone



Source FCBA France	Durée de vie typique
Construction	15 – 75 ans
dont charpente	75 ans
dont menuiserie	20 ans
Papier-carton	1 - 16 mois
Meuble	5 – 25 ans
Emballage	1 mois – 8 ans
Bois Energie	1 mois – 2 ans

Tableau 1. Durée de vie de produits à base de bois en France (source : FCBA, 2008 ; données 2005)

Il existe plusieurs approches de l'évaluation des flux de CO₂ (ou de carbone) ; les méthodes employées sont parfois complexes et de toute façon évolutives puisque certains aspects du stockage du carbone ne sont pas encore pris en compte, faute pour l'instant de méthodologie reconnue.

La France a réalisé un reporting détaillé de la variation du stock de carbone représenté par les produits bois pour l'année 2005: le bilan en était un accroissement de ce stock de 4,7 Mt eq. CO₂. A noter que le stock total des produits bois en France atteignait alors 344 Mt eq. CO₂. Pour l'année 2013, le stock total des produits bois s'est accru de 2,52 Mt eq. CO₂. Pour information, le tableau 1 renseigne sur la durée de vie typique des produits à base de bois.

L'empreinte carbone des produits bois et le stockage de carbone

L'empreinte carbone des produits, c'est-à-dire l'analyse des émissions-captations de GES est celui des produits. L'empreinte carbone des produits est une information dont la diffusion vers le consommateur va croissante. Les lois « Grenelle », en établissant le principe d'un « affichage environnemental » des produits, ont accéléré la demande de ce type d'information. L'empreinte carbone est établie en appliquant la méthodologie de l'Analyse de Cycle de Vie (ACV). Il s'agit d'une approche par flux, sur le cycle de vie du produit. Une différence importante avec l'approche des bilans territoriaux est qu'il n'y a pas, pour l'empreinte carbone, de notion de période d'analyse et que la date d'émission ou de captation des GES n'est donc pas considérée. La figure 2 montre les émissions de GES liées au carbone fossile. Celles-ci peuvent survenir, comme on peut le voir ici dans le cas d'un produit de construction, à toutes les phases du cycle de vie (depuis la sylviculture et l'exploitation jusqu'à la fin de vie du produit bois).

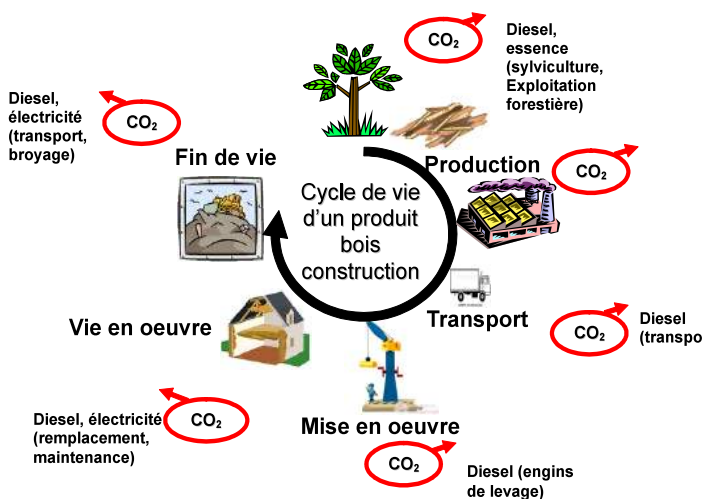


Figure 2. Le cycle de vie d'un produit bois et le CO₂ fossile

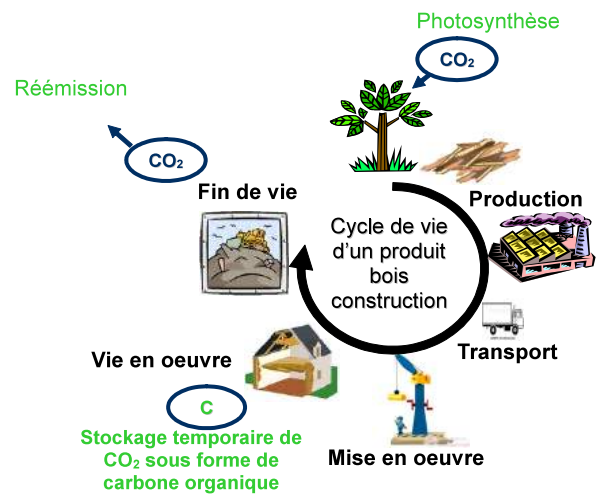


Figure 3. le cycle de vie d'un produit bois et le C biomasse

Le carbone biomasse a, par contre, un devenir différent lors du cycle de vie d'un produit bois; comme illustré sur la figure 3, il est capté par photosynthèse en forêt, puis stocké pendant toute la durée de vie du produit, durée qui peut, pour un produit de construction atteindre plusieurs décennies, voire dépasser le siècle. En fin de vie, ce carbone peut être ré-émis, sous forme de CO₂ si le produit est brûlé. S'il est enfoui, il peut se dégrader partiellement en CO₂ et en CH₄, gaz à plus fort coefficient de réchauffement climatique. Cependant, dans des conditions d'enfouissement dans le sol, cette dégradation est lente et la littérature scientifique indique qu'après 100 ans, seuls 15% environ de la masse de bois sont dégradés.

En analyse de cycle de vie traditionnelle, le calcul se fait sur l'ensemble du cycle de vie, en comptabilisant les flux de GES d'origine fossile et d'origine biomasse: captations et émissions de CO₂, émissions de CH₄ le cas échéant. Ce calcul ne prend pas en compte le stockage temporaire de carbone biomasse. Cela signifie que si l'on considère deux scénarios, l'un où le produit bois est brûlé immédiatement après sa production et l'autre où il est brûlé 100 ans plus tard, l'ACV traditionnelle donnera le même résultat d'empreinte carbone. Or, le CO₂ qui n'est pas dans l'atmosphère ne participe pas à l'effet de serre et toute prolongation du stockage du carbone est donc bénéfique, dans le contexte de mutation actuelle. Dans ce cadre, si la forêt est stable ou en croissance, les produits participent au puits de carbone en évitant l'émission immédiate de CO₂ par la dégradation naturelle ou la combustion du bois.

Il existe une approche qui permet de prendre en compte le « bénéfice climat » du stockage temporaire du carbone dans les produits, en tenant compte des dates des émissions de GES pour quantifier l'impact sur le changement climatique sur la période d'analyse (typiquement 100 ans) : il s'agit de la méthode dite des « PRG (potentiel de réchauffement global) dynamiques », qui tient compte du décalage dans le temps des émissions de GES.

Il peut ainsi être proposé de comptabiliser cet effet par une déduction des émissions de CO₂, au prorata de la quantité de carbone biomasse contenue dans le produit et de sa durée de vie. Considérant un horizon de temps de 100 ans pour l'étude des impacts des produits, le bénéfice du stockage est ainsi établi à 1/100ème du carbone contenu par année de stockage. Ce principe est retenu comme une information complémentaire pour les déclarations environnementales de produits de construction bois, dans la norme EN 16485 ; c'est également le cas en France dans le référentiel de bonnes pratiques de l'affichage environnemental des produits de grande consommation (BPX 30-323) ainsi que dans son équivalent britannique (PAS 2050). Enfin, la norme ISO 14067 concernant l'empreinte carbone des produits retient également ce principe.

Au niveau des bâtiments, différentes initiatives visent également à valoriser ce stockage temporaire du carbone dans les produits bois. Le Label Bâtiment Biosourcé (fig.4), établi par un décret de 2012

valorisait déjà la quantité de matériau biosourcé par m² de surface bâtie ; le label «Bâtiment Bas Carbone » (BBCA) proposé par l'association du même nom depuis début 2016 (fig.5), valorise également cette quantité de matériau biosourcé dans le bâtiment, en complément de l'empreinte carbone calculée par ACV.

	Poutre Lamellé collé = moins 85,3 kg éq. CO₂	1 m ³ support plancher ou toiture, pendant 100 ans
	Panneau MDF (Medium Density Fiberboard) Standard Mélaminé = moins 7,35 kg éq. CO₂	1 m ² de panneau standard utilisé en milieu sec, épaisseur 17 mm, posé, non structurelle, pendant 50 ans
	Parquet contrecollé 3 plis, parement chêne, épaisseur 13-14 mm, fabriqué en France = moins 2,64 kg éq. CO₂	1 m ² de revêtement de sol intérieur, pose flottante, finition vernis acrylique, sur 45 ans avec 2 rénovations
	Palette = moins 15,0 kg eq. CO₂	neuve standard multi-rotation, durée de vie 8 ans avec réparations et valorisation en bois énergie en fin de vie

Figure 6. Empreinte carbone de différents produits bois. Les valeurs d'empreinte C négatives correspondent soit à une captation nette de GES sur le cycle de vie de produits (cas des produits de construction) soit à des émissions évitées de GES (cas de la palette) - Source FCBA

Figure 4. Label bâtiment biosourcé, y compris à la norme haute qualité environnementale



Figure 5. Label bâtiment bas carbone

Perspectives

Depuis 2013, le stockage de carbone dans les produits bois est donc officiellement pris en compte dans la comptabilité nationale sur les émissions et puits de gaz à effet de serre. Dans le cadre d'un accroissement de la quantité de bois présente sur le marché, ce réservoir de carbone est un puits qui contribue à réduire le bilan national d'émissions. Les politiques de développement des usages du bois matériau (fig.7 et 8) peuvent donc avoir un effet favorable sur ce bilan.

A l'échelle des produits, les méthodes normalisées actuelles de déclaration environnementale ne permettent qu'une reconnaissance partielle de l'effet de stockage temporaire de carbone dans les produits à base de bois pendant leur durée de vie. L'amélioration de cette reconnaissance passe par des progrès méthodologiques en ACV des produits bois qui doivent prendre en compte les questions complexes de scénarios de développement de la forêt d'origine du bois. Dans le secteur de la construction, il sera intéressant de voir la progression des labels « Bâtiment biosourcé » et « Bâtiment Bas Carbone », qui intègrent dans leurs critères la masse de biomasse présente et donc le carbone biogénique stocké.

Ce qu'il faut retenir

- Le stockage de carbone dans les produits bois constitue un puits de carbone à l'échelle nationale dans la mesure où la quantité de produits bois présente sur le marché s'accroît. Ce puits est de l'ordre de 2 à 5 Mt eq CO₂ par an, à comparer au puits forestier actuel de l'ordre de 70 Mt eq CO₂.
- Dans le calcul de l'empreinte carbone des produits bois, le bénéfice du stockage dans le temps ou décalage des émissions de GES n'est actuellement que partiellement reconnu, pour cause de questions méthodologiques ; les enjeux de cette reconnaissance à l'échelle du produit peuvent être significatifs pour les produits à longue durée de vie tels que les bois de structure en construction ; certains ont ainsi une durée de vie de 100 ans et un contenu en CO₂ équivalent stocké supérieur aux émissions de CO₂ fossile de l'ensemble de leur cycle de vie.
- Les labels « Bâtiment Biosourcé » et « Bâtiment Bas Carbone » permettent déjà de valoriser le carbone stocké dans les produits de construction.



Figure 7. *Bâtiment bois grande hauteur à Toulouse* (Source : Advibois)

Figure 8. *Le pôle bois Atlanbois à Nantes ; bâtiment B* (Source : <http://www.groupea5.com/?portfolio=le-pole-bois-batiment-b>)



Pour en savoir plus

Carbone forêt-bois : des faits et des chiffres (réalisation, FCBA, mise à jour 30.06.2014) http://www.fnbois.com/sites/default/files/mediatheque/Vademecum_Carbone-Foret-Bois_2012.pdf

Recommandation : la lecture de cette fiche peut être complétée par celle des fiches 3.04, 6.04, 6.05, 6.07, 7.05, et 7.13

Le bois et ses dérivés peuvent-ils se substituer à d'autres matériaux et sources d'énergies au bénéfice du climat ?

Le bois est historiquement un matériau d'usage structurel utilisé en construction, en ameublement, pour l'emballage et également une source d'énergie. Il est aujourd'hui en compétition pour certains de ces usages, d'une part avec d'autres matériaux industriels qui dominent les marchés évoqués, tels que le béton, l'acier, la terre cuite, les matières plastiques et d'autre part avec les énergies fossiles, charbon, pétrole, gaz et énergie nucléaire. Pour de nombreuses applications, le différentiel de coût en émissions de CO₂ fossile de la mise à disposition des produits bois par rapport à leurs concurrents peut permettre des réductions d'émissions de gaz à effet de serre d'origine fossile et atténuer ainsi le changement climatique et ses effets.

Qu'est-ce que l'effet de substitution ?

Les études évaluant l'impact de la filière forêt bois sur le changement climatique évoquent le stockage du carbone en forêt, le stockage du carbone dans les produits bois et les effets de substitution. En effet, lorsque l'on souhaite comparer plusieurs scénarios d'évolution de la filière, on obtient pour chacun des scénarios des assortiments différents de produits et de combustibles bois rendant chaque scénario différent en termes de services rendus. L'extension des frontières du système aux produits concurrents permet de rendre les scénarios comparables. On peut aussi considérer qu'une production additionnelle ou au contraire une diminution de la mise à disposition d'un produit ou combustible bois engendre des variations de production des produits concurrents.

L'effet de substitution correspond au différentiel d'émissions de gaz à effet de serre fossile entre le cycle de vie d'un produit ou combustible bois et le cycle de vie des produits ou combustibles concurrents à fonctionnalité équivalente. Le bilan de gaz à effet de serre d'un produit ou d'un combustible se calcule grâce à l'Analyse de Cycle de Vie (ACV), méthodologie qui est normalisée. Le bilan du produit bois intègre les impacts de la sylviculture, de l'exploitation forestière, de la première transformation, de la seconde transformation, des différentes phases de transport, de la maintenance du produit bois et de sa fin de vie (fig.1). Si le produit bois et le produit concurrent sont valorisés en énergie ou recyclés, un crédit est alloué. Le bilan d'un combustible bois intègre les impacts de la sylviculture, de l'exploitation forestière, de la combustion du bois et de la gestion des cendres (elles peuvent par épandage retourner en forêt).

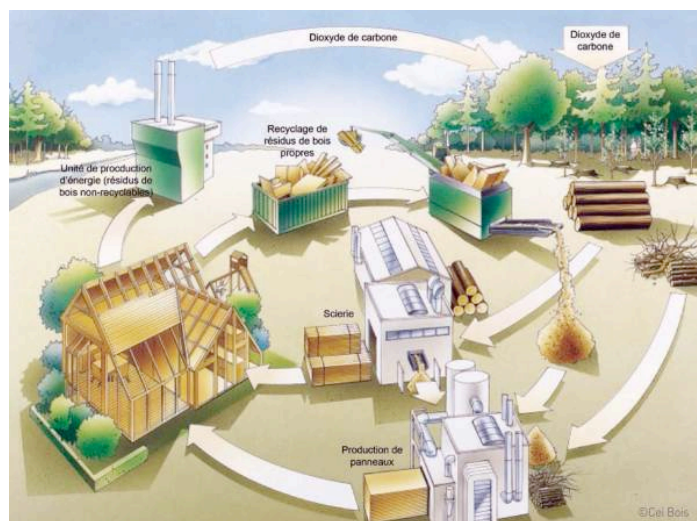


Figure 1. Cycle de vie du bois. Noter que ce schéma ne représente pas la combustion directe du bois «frais» (Source : <http://xylofutur.fr/les-filieres/>)

De nombreux coefficients de substitution ou facteurs de déplacement existent dans la littérature. Plusieurs précautions doivent être prises avant de les utiliser :

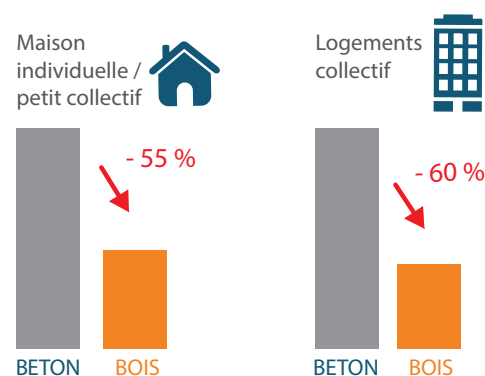
- le bois peut être utilisé comme matériau ou comme énergie ou successivement en matériau puis en énergie, et des sous-produits d'un processus de transformation du bois peuvent être utilisés en énergie ; il faut donc correctement définir ce que l'on considère comme étant de la substitution énergétique et de la substitution matière.
- les unités sont importantes : il est nécessaire de savoir à quoi se rapportent les coefficients. En effet, certains coefficients sont calculés par m³ de bois sortant de la forêt, entrant dans la chaîne de production, d'autres par kg de carbone contenu dans le produit final et donc sortant de la chaîne de production.
- la filière bois génère de nombreux co-produits au cours des processus de transformation. Certaines études intègrent la valorisation de ces co-produits dans les coefficients de substitution, d'autres les calculent séparément.
- certain coefficients de substitution intègrent l'ensemble du cycle de vie des produits bois, d'autres sont calculés séparément pour la production et pour la fin de vie, étant donné que ces deux étapes n'interviennent pas au même moment.

Substitution matière : substitution du bois à d'autres matériaux

De nombreuses études montrent que les bilans de gaz à effet de serre fossile des produits bois est inférieur à celui des produits concurrents. Une méta-analyse réalisée en 2010 montre que le produit bois permet d'éviter en moyenne 2,1 t d'équivalent carbone par tonne de carbone contenue dans le produits bois (référence Sathre, R., and J. O'Connor). Une étude réalisée au niveau européen en 2016 (Rüter et al., "ClimWood2030, Climate Benefits of Material Substitution by Forest Biomass and Harvested Wood Products: Perspective 2030) montre que « l'utilisation matériau des produits bois entraîne une baisse des émissions de GES fossile sur l'ensemble du cycle de vie par comparaison à des produits alternatifs fonctionnellement équivalents de l'ordre de 1.5 à 3.5 t CO₂ par tonne de produits bois » (soit entre 1 t et 2,5 tonnes d'équivalent carbone par tonne de carbone contenue dans le produits bois). Il s'agit là de valeurs moyennes européennes, les scénarios nationaux correspondant aux parts de marché des différents matériaux auxquels le bois peut se substituer, le mix énergétique et les scénarios de fin de vie des produits peuvent faire varier significativement ces valeurs. Si l'on remplaçait les produits bois par d'autres matériaux, les émissions de GES fossiles seraient donc d'autant plus élevées. Cette même étude conclut que, d'ici 2030, « une forte augmentation de l'utilisation du bois en remplacement d'autres matériaux, notamment dans la construction ... peut réduire les émissions de GES de 11 Mt CO₂ eq/an par rapport au scénario de référence » (atteinte des objectifs de l'UE pour 2020 en matière d'énergie et de climat et scénario «business as usual» jusqu'en 2030) . La figure 2 illustre l'intérêt de la construction en bois par rapport au béton en termes d'émission de CO₂ évitée.

Figure 2. Gain de CO₂ de la construction en structure bois par rapport à la construction traditionnelle

Une construction en bois plutôt qu'en béton permet d'éviter une part significative des émissions de CO₂ liées au gros-œuvre : en moyenne 55% pour une maison individuelle et 60% pour un logement collectif, sans prendre en compte le stockage du carbone. En moyenne, cela correspond à une diminution d'environ 1/4 des émissions totales liées à la construction du logement. Pour une maison individuelle en bois de 100 m², les émissions évitées par rapport à une construction traditionnelle s'élèvent à 10 tonnes de CO₂ environ, tandis que pour un bâtiment collectif de 2000 m² (R+5 avec 6 logements par étage), les émissions évitées par rapport à une construction traditionnelle s'élèvent à 370 tonnes de CO₂ environ. (Source : étude carbone 4, 2015 - cette étude n'a toutefois pas fait l'objet d'une revue critique, et de ce fait n'est pas conforme aux normes ISO 14040 et 14044).



Substitution énergie : substitution du bois à d'autres sources d'énergie

La consommation d'énergies fossiles (gaz naturel, pétrole, charbon) est la plus importante cause d'émission de CO₂ d'origine fossile. La combustion du bois génère aussi des émissions de CO₂ mais d'origine « biomasse ». La préparation de ce combustible bois (broyage), sa mise à disposition pour les chaufferies (transport) sont cependant à l'origine de l'utilisation de carburants fossiles (ex : diesel) et donc de quelques émissions de dioxyde de carbone fossile. Le bilan des émissions de GES d'origine fossile du bois-énergie reste cependant largement inférieur à celui des énergies fossiles. A titre d'exemple, il est estimé que la substitution du fioul domestique par le broyat de palette permet d'éviter l'émission de 296 kg de CO₂ d'origine fossile par MWh (source : bilan carbone ADEME/FCBA). Le développement de chaufferies et de centrales fonctionnant au bois en substitution de combustibles fossiles est donc un moyen de réduire ces consommations et donc les émissions de CO₂ d'origine fossile. Pour ce qui concerne la situation française, le facteur de substitution moyen pour l'ensemble des productions d'énergie à partir du bois est de l'ordre de 0,5 t CO₂ eq./m³, soit environ 0,6 t d'équivalent carbone par tonne de carbone contenu dans le combustible bois (référence : ADEME. 2015. "Les Avis de l'ADEME - Forêts et Atténuation du Changement Climatique."). Une estimation de la contribution de la substitution «énergie» dans la filière française est donnée en fig.3.

Le potentiel de substitution de la filière bois en France métropolitaine : situation actuelle et perspectives

Une étude synthétique publiée en France en 2016 (fig. 3) présente un bilan global en 2013 pour le secteur forêt-bois des flux annuels de matière et de CO₂ au niveau des forêts et de la filière bois. On observe un fort effet «puits» des écosystèmes forestiers qui fixent chaque année environ 88 Mt eq.CO₂ s'ajoutant au stock déjà présent. En revanche, l'effet «puits» des produits à base de bois est faible.

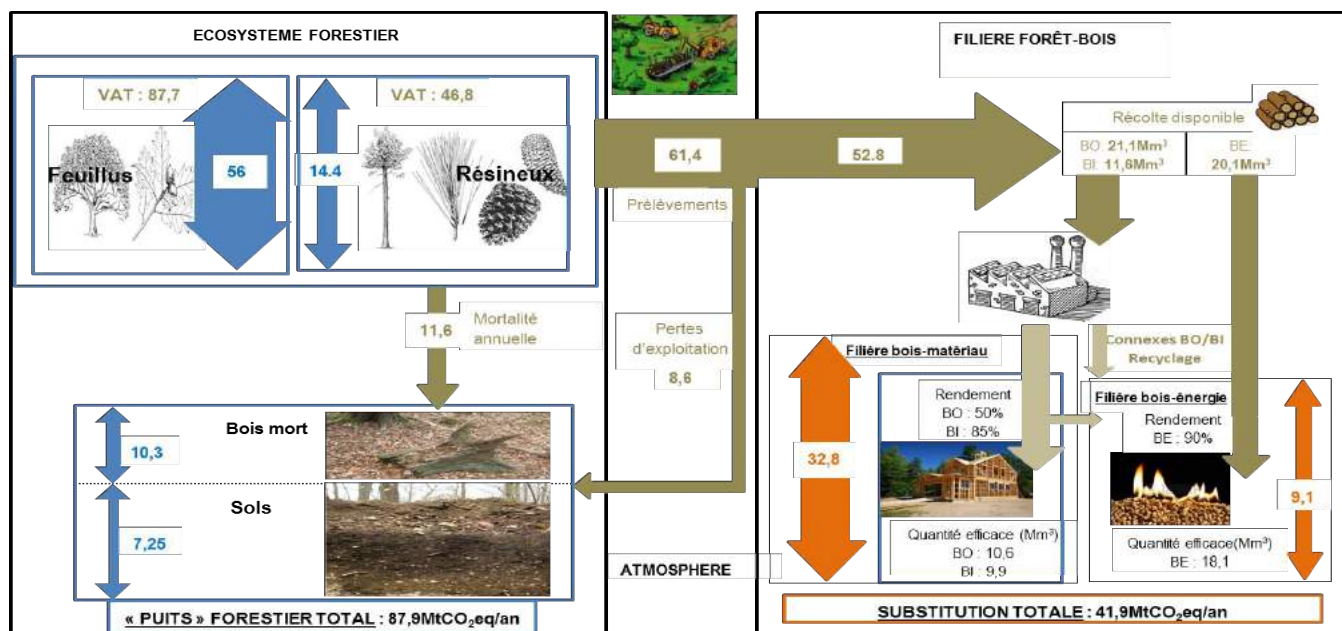


Figure 3. Flux de matière et de CO₂ aux différents stades de la filière forêt-bois française en 2013 (VAT=Volume aérien total, BO=Bois d'œuvre, BI=Bois d'industrie, BE=Bois énergie) - (Source : Les leviers forestiers pour lutter contre le changement climatique - Résumé du rapport de l'étude réalisée par l'INRA pour le compte du MAAF – juin 2016)

- ↑ Effet de substitution (MtCO₂eq évités/an) SUBSTITUTION
- ↕ Variation des stocks de carbone dans l'écosystème forestier (MtCO₂eq/an) STOCKAGE
- Bois provenant de la forêt (Mm³/an)
- Bois provenant de l'industrie ou produits en fin de vie (Mm³/an)

* La variation de stock de carbone dans les produits bois a été estimée à 0 et -0,1 MtCO₂eq/an pour BO et BI respectivement et n'apparaît donc pas dans les flux de CO₂ de la filière en 2013

L'effet de substitution du bois à d'autres matériaux et sources d'énergie est très important, respectivement 32,5 et 9,1 Mt eq CO₂/an. Ceci incite également à privilégier les stratégies visant à développer l'utilisation du bois d'oeuvre et à faire intervenir la combustion en fin de cycle de vie.

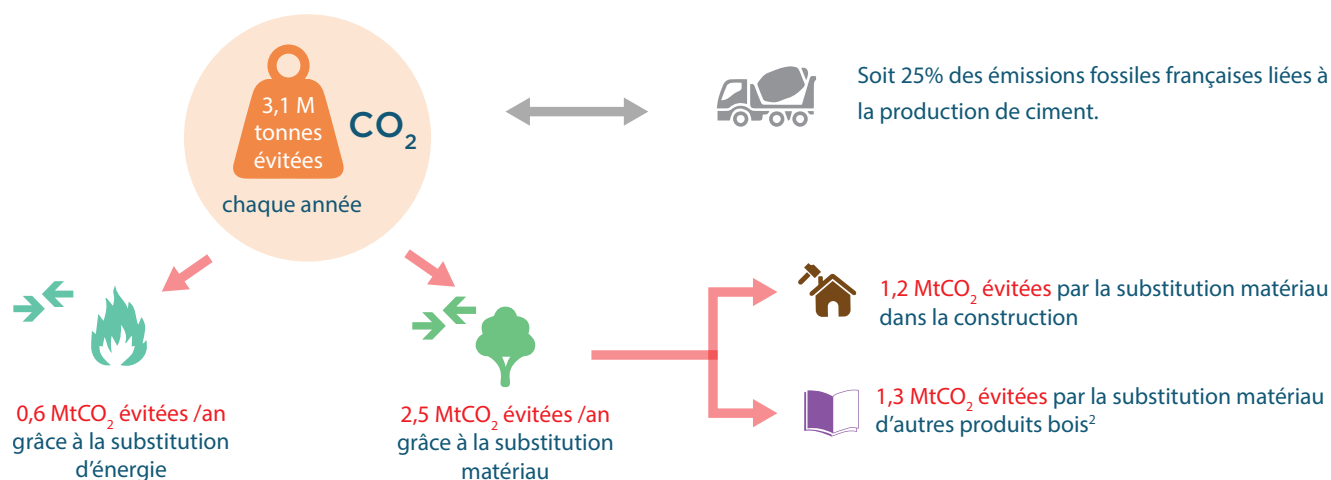


Figure 4. Le développement de la construction bois peut contribuer significativement à la réduction de l'émission de GES d'origine fossile - Un triplement de la construction bois d'ici à 2030, constitué pour moitié de CLT (cross laminated timber) et pour moitié d'ossature bois, et alimenté avec 100% de bois français, permettrait des bénéfices considérables d'un point de vue environnemental : émission évitée de 3,1 Mt de CO₂/an (et aussi économique (emploi, balance commerciale) (Source : étude carbone 4, 2015)

Pour estimer les bénéfices en termes d'émission de GES fossile que pourrait apporter un développement de l'utilisation du bois, des scénarios ont été élaborés. L'un d'entre eux a estimé qu'un triplement de la construction bois d'ici à 2030 permettrait d'éviter d'émettre annuellement 3,1 Mt de CO₂ (fig.4). Assurer cette production avec 100% de bois français nécessiterait : i) d'augmenter la récolte de résineux de 25% d'ici à 2030, soit de 1,5% par an ; ii) de produire 2,4 Mm³ de sciages résineux séchés supplémentaires, soit 5 fois plus qu'en 2012 ; iii) d'investir de l'ordre de 800 millions à 1 milliard d'euros dans des outils de première et deuxième transformation.

Pour en savoir plus

Carbone forêt-bois : des faits et des chiffres (réalisation, FCBA, mise à jour 30.06.2014) http://www.fnbois.com/sites/default/files/mediatheque/Vademecum_Carbone-Foret-Bois_2012.pdf

Étude carbone 4, 2015 http://www.codifab.fr/sites/default/files/etude_carbone_4_note_de_communication_filiere_bois_vf_mai_2015.pdf

Leviers forestiers en termes d'atténuation pour lutter contre le changement climatique. Dhôte J.-F. et al., (2016). Résumé du rapport d'étude pour le Ministère de l'agriculture, de l'agroalimentaire et de la forêt, Paris : INRA-DEPE

Recommandation : lire en complément les fiches : 3.04, 6.04, 6.05, 6.06, 7.05, et 7.13

Ce qu'il faut retenir

- Le bois est un matériau qui peut se substituer à des matériaux d'origine minérale ou fossile, dont la fabrication génère plus d'émissions de GES ; la substitution de ces matériaux par le bois permet donc de réduire les émissions de GES fossiles.
- De même, le bois énergie peut se substituer à l'utilisation de combustibles fossiles tels que le gaz, le pétrole et le charbon, avec des bénéfices de réduction des émissions de GES fossiles significatifs.
- L'évitement de l'émission de CO₂ fossile par substitution (énergie, et surtout bois matériau) est très important ; il peut être amplifié par le développement de l'utilisation de bois dans la construction.

Quelles stratégies pour adapter les forêts au changement climatique ?

Le changement climatique, par son évolution tendancielle et surtout des événements extrêmes, peut provoquer un dysfonctionnement marqué des écosystèmes forestiers (dépérissement, échecs de régénération, altération des interactions entre les arbres et les espèces associées). Ce dysfonctionnement est lié à une mauvaise adaptation des arbres à des conditions locales modifiées par le CC, et affecte les biens et services procurés par les écosystèmes forestiers à la société. Ces impacts sont déjà à l'oeuvre, ce qui plaide pour une action immédiate à travers des stratégies d'adaptation visant à les réduire, sans attendre des effets trop tardifs des politiques d'atténuation. Quels sont les enjeux et les défis ? Quelles sont les options possibles ?

Adaptation : un mot à plusieurs sens

Le terme adaptation a plusieurs significations. Il peut désigner un **état** : celui d'une forêt, d'un individu ou d'un caractère ; il rend compte de l'adéquation d'un système biologique aux conditions environnementales à un instant donné. On dit par exemple qu'une population est adaptée à son environnement. Adaptation se dit également des **processus écologiques et évolutifs** sous-tendant l'ajustement des fonctions biologiques d'un être vivant avec les conditions extérieures et leurs évolutions. Enfin, ce terme peut signifier l'ensemble des **actions anthropiques**, comme la gestion et les politiques forestières, qui se fondent sur ces processus, pour améliorer et accélérer les ajustements des écosystèmes forestiers aux conditions nouvelles, et limiter leur vulnérabilité. C'est cette définition qui constitue l'objet de la présente fiche. Il faut aussi évoquer l'**adaptabilité**, c'est à dire la plus ou moins grande aptitude d'un système biologique à s'ajuster grâce aux processus évolutifs naturels.



Figure 1. Mélèzes gravement affectés par la sécheresse

Photo N. Bréda, INRA

Pourquoi des actions anthropiques pour adapter les écosystèmes forestiers sont-elles nécessaires ? La réponse est contenue dans les lignes suivantes et illustre les limites des adaptations basées sur des processus évolutifs naturels : « À l'échelle du siècle, le devenir des forêts dépendra avant tout de leurs capacités d'adaptation au changement climatique : résistance physiologique, évolution et

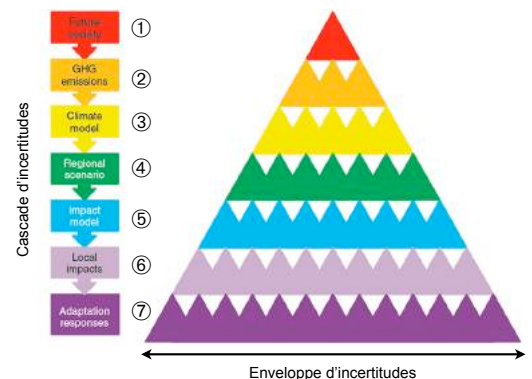
diversité génétiques des peuplements, migration vers des environnements plus favorables, en altitude comme en latitude, pratiques sylvicoles. La plasticité et la biodiversité des forêts constituent leurs meilleurs atouts, mais dans l'état actuel des connaissances, nous ne savons pas comment ni dans quelle mesure ces deux paramètres permettront aux arbres de s'adapter à des changements si rapides. En effet, les aires climatiques des espèces se déplaceront à une vitesse bien supérieure à celle de leurs migrations spontanées. Dès lors, les capacités de migration naturelles ne suffiront probablement pas à préserver tous les écosystèmes et leur biodiversité. » (Lefèvre et al, 2015). Les arbres sont des organismes à longue durée de vie. Une grande partie des décisions forestières actuelles 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 difficulté majeure que la recherche a encore relativement peu prise en compte.

Réfléchir avant d'agir : quelques principes de base à considérer

Les stratégies d'adaptation au CC devront obligatoirement être **évolutives**. En effet la recherche d'un état d'équilibre idéal et figé de la forêt grâce à des mesures d'adaptation prises une fois pour toutes, en réponse à des conditions locales à un instant donné, est illusoire. Il conviendra plutôt de gérer des transitions et des trajectoires de dynamique de peuplement en fonction de scénarios. Plus qu'à un «changement d'état», on est face à un «état de changement» récurrent (Lefèvre, 2015). Il faut donc concevoir ces stratégies d'adaptation comme des processus dynamiques, car les arbres d'aujourd'hui seront confrontés à des conditions climatiques changeantes, actuellement et dans les prochaines décennies, voire un siècle. Ceci va conduire à revoir le paradigme de la gestion forestière traditionnelle.

Le **futur est marqué d'incertitudes multiples** liées : i) aux **scénarios climatiques** eux-mêmes (ampleur et fréquence des événements extrêmes), résultant de l'**émission de gaz à effet de serre**, découlant elle-même des modes de **développement socio-économique** ; ii) à la difficulté de prévision des impacts aux niveaux global et local ; iii) à la complexité et à la diversité selon les zones climatiques des écosystèmes forestiers, dont le fonctionnement et la dynamique sont régis par de multiples organismes aux **cycles de vie très différents**, des champignons aux arbres, en passant par les insectes et les grands herbivores, ce qui rend difficile la prédiction de leurs évolutions ainsi que celle des effets des mesures adaptatives ; iv) à la **capacité biologique de réponse** des organismes, et notamment des arbres, espèces longévives, chez qui le cumul d'impacts négatifs (ex : sécheresses; fig.1) peut avoir des effets sérieux, et contrecarrer une tendance générale à l'acclimatation. L'un des défis majeurs est d'anticiper en évaluant les risques et en intégrant les incertitudes.

Figure 2. Cascade des incertitudes et croissance de «l'enveloppe» des incertitudes liées aux différentes sources allant de ① : la société future et son économie, jusqu'à ⑦ : réponses d'adaptation, en passant par ② : émission de gaz à effet de serre ; ③ : modèles climatiques ; ④ : scénarios régionaux ; ⑤ : modèles d'impact ; ⑥ : impacts locaux - Source : Wilby and Dessai, 2010)



Par ailleurs, les stratégies d'adaptation doivent combiner des **objectifs à court et moyen terme**. Dans une perspective à court terme, on va surtout viser l'**adaptation** locale du peuplement forestier actuellement en place, en agissant sur lui, pour limiter les risques encourus du fait du CC. Dans une perspective à long terme (classique pour les forestiers !), on va plutôt considérer la phase de renouvellement du peuplement (celle où on peut jouer sur l'adaptation génétique) ; dans un contexte d'incertitudes plus marqué, il s'agira par une gestion appropriée du peuplement jusqu'à cette étape, de **préserver des options** d'avenir, en favorisant l'évolutivité des écosystèmes, et en stimulant et accélérant les processus de sélection naturelle conduisant vers une meilleure adaptation. Chaque approche comporte des risques et des bénéfices à court et long terme, et il conviendra d'éviter les antagonismes entre les objectifs de court et long terme.

Enfin, il est important de considérer les objectifs sur lesquels faire porter l'adaptation. En effet, la forêt procure tout un ensemble de services sur lesquels le climat agit différemment. L'action adaptative des forestiers va donc cibler prioritairement certains de ces services jugés de plus fort enjeu (fourniture de bois, conservation des habitats). Toutefois, il n'est ni réaliste ni faisable économiquement d'envisager des actions anticipatives sur toutes les forêts. Il faudra là aussi prioriser selon de nombreux critères liés aux enjeux et aux risques encourus (vulnérabilité) et en s'efforçant de moduler les interventions selon le type de forêts concerné : forêt semi-naturelle à régénération majoritairement naturelle gérée plus ou moins intensivement ou forêt plantée à partir de matériel forestier de reproduction autochtone ou introduit.

Comment la gestion forestière peut-elle de manière opérationnelle agir sur l'adaptation ?

Les lignes qui précèdent laissent présumer, que dans un contexte totalement nouveau auquel les forêts n'ont jamais été confrontées, les principes de la **planification** forestière qui définit dans l'espace et dans le temps les grandes orientations de la gestion (essences-objectifs, critères d'exploitabilité, effort de renouvellement), et les principes de la **sylviculture** appliqués à la gestion d'un peuplement, doivent être profondément repensés. Par ailleurs, la diversité des types de forêts, des conditions écologiques où elles se trouvent, et des objectifs qui leur sont assignés fait que chaque forêt, voire chaque parcelle est un cas particulier ; il n'y a donc pas de solution « passe partout ». Dans ce qui suit, on se contentera de présenter quelques pistes d'action dans le cadre de la sylviculture et de la planification, car on ne dispose pas encore du corpus de connaissances nécessaires pour bien fonder des « règles » de gestion.

a) la sylviculture

La diminution de la densité des arbres en phase de jeunesse (dépressage) et/ou au long de la vie du peuplement (éclaircies) peut être pilotée pour atténuer le stress hydrique (fig. 3), et réduire l'exposition au risque par abaissement de la durée du cycle de production. Reste cependant à déterminer à partir de quel stade de développement du peuplement les opérations doivent débuter, et comment les échelonner. Une autre question concerne la gestion de la compétition entre espèces dans le cas des peuplements mélangés. Avec la désignation de tiges d'avenir, et le choix des arbres récoltés en éclaircie, se pose la question de la sélection des individus à privilégier. Enfin, à la récolte du peuplement visant à assurer son renouvellement par régénération naturelle ou par plantation, on dispose là encore marges de manoeuvre, concernant par exemple la conduite des coupes progressives en régénération naturelle, ou le choix du matériel végétal en plantation, l'espèce étant choisie au niveau de la planification.

Tout au long du cycle de vie du peuplement (du jeune plant à l'arbre mûr), la sylviculture va agir sur l'environnement physique (relations hydriques, nutrition minérale) et biologique (acclimatation) des tiges d'avenir. Mais, la succession des coupes pratiquées dans un peuplement va aussi influencer sur les processus évolutifs tels que : i) la sélection selon les conditions locales ; ii) les flux de gènes par émission de graines ou pollen ; iii) le nombre et la répartition spatiale des arbres participant à la reproduction. Ainsi au moment du renouvellement par régénération naturelle, la population des jeunes semis sera génétiquement différente de celle de la génération antérieure.

Il peut être intéressant à court terme d'avoir une population adaptée à des conditions locales changeantes, tandis qu'à long terme il s'agit de se préparer à faire face à des incertitudes sur les besoins adaptatifs futurs. Des compromis seront parfois nécessaires. Ainsi, on observe que les arbres ou les peuplements soumis à un stress régulier modéré récupèrent aussi plus rapidement lors de stress plus prononcés : dès lors, l'objectif ne sera pas toujours d'éliminer complètement le stress, mais parfois aussi simplement de le maintenir à un niveau acceptable pour malgré tout favoriser l'acclimatation. Autre exemple, on peut cibler à court terme certaines adaptations, alors qu'à long terme il est préférable de privilégier un niveau élevé de diversité.



Figure 3. *L'éclaircie expérimentale (parcelles circulaires) pratiquée dans un taillis de chêne vert en Catalogne fait apparaître en année sèche une meilleure résistance des zones traitées.* Source : C. Gracia, CREA



Figure 4. Exemple historique réussi de migration et gestion assistées : on favorise la régénération du cèdre (espèce exotique introduite seconde moitié du 19^{ème} siècle) par rapport au hêtre plus vulnérable au CC sur les pentes du Mont Ventoux (Vaucluse)

b) la planification (aménagement)

Lors du renouvellement des peuplements, le choix est soit la régénération naturelle, à partir du peuplement en place, soit l'introduction d'un nouveau matériel végétal par plantation, en faisant appel à des origines (sources de graines) de la même essence (migration assistée de provenances), soit en introduisant une nouvelle essence

(migration assistée d'espèce). Le changement d'essence est la mesure qui peut avoir le plus fort effet adaptatif à long terme, mais il s'agit néanmoins d'une approche délicate, qui nécessite de bien connaître ses exigences écologiques, et d'anticiper des effets inattendus de son interaction avec les organismes vivants présents localement, ainsi que les risques encourus. Dans tous les cas, il ne faut pas «mettre tous ses oeufs dans le même panier» en misant sur une seule espèce (ou une seule origine à l'intérieur d'une espèce), mais limiter les risques en veillant à la diversité du matériel introduit (par exemple un mélange de plusieurs origines). Bien entendu, de telles options nécessitent de disposer de connaissances suffisamment étayées et de prendre en compte leur faisabilité économique (coût élevé des plantations).

Les voies possibles de progrès : la gestion adaptative des forêts

Les exemples présentés ci-dessus «confirment qu'il faudra adopter un mode adaptatif de gestion des forêts, fondé sur l'ajustement en continu des pratiques testées. Cette gestion adaptative pourra s'appuyer sur les progrès de la recherche, et des techniques de mesures environnementales, par exemple. Ainsi, on sait aujourd'hui détecter de très fines évolutions des variables climatiques (température, humidité ou rayonnement lumineux), ainsi que des concentrations en dioxyde de carbone et en polluants. Organisées en réseaux standardisés et intégrés couvrant la plus grande partie des continents, les stations de mesure permettent de suivre en continu le fonctionnement biogéochimique des forêts... Mais l'innovation n'est pas à rechercher uniquement dans les nouvelles technologies, les méthodes d'analyse ou les simulations numériques. L'adaptation des forêts au changement climatique passera nécessairement par de nouvelles pratiques d'anticipation et d'accompagnement. La sylviculture adaptative devra faire évoluer les forêts en tenant compte des contraintes écologiques et socioéconomiques. Tout l'enjeu de cette évolution consistera à se fonder sur des scénarios du futur plutôt que sur les savoir-faire du passé». Guehl et al 2016

Pour en savoir plus

- Adaptation des forêts méditerranéennes aux changements climatiques - Innovations Agronomiques 47 (décembre 2015)
- Vers une gestion adaptative des forêts, Lefèvre et al. in «L'adaptation au changement climatique» Pour la Science - INRA (2015)
- La gestion des forêts mondiales et ses interactions avec le changement clim., Guehl et al. in «Revue de l'académie d'agriculture, n°9, mai 2016»

Ce qu'il faut retenir

- Les stratégies d'adaptation des forêts au changement climatique doivent obligatoirement être évolutives et combiner des objectifs à court et long terme
- Les pratiques sylvicoles doivent stimuler et accélérer les processus naturels qui participent à l'adaptabilité des populations
- La «migration assistée» par introduction d'espèces nouvelles ou de populations de la même espèce mais génétiquement différentes doit être soigneusement pesée
- Il sera nécessaire de prioriser les forêts sur lesquelles les mesures d'adaptation doivent porter

Recommandation : la lecture de cette fiche peut être complétée utilement par celle des fiches 3.02, 6.03, 6.04