

Forêt et cycle du carbone

Forest and carbon cycle

Marianne RUBIO*

Résumé

Les forêts renferment, à l'échelle mondiale, environ la moitié du carbone accumulé par les écosystèmes terrestres, tout en recouvrant un peu moins de 30 % de la surface terrestre. La photosynthèse des forêts recycle annuellement 5 % du CO₂ atmosphérique : sans les forêts, on estime, avec beaucoup d'incertitude, que la vitesse d'augmentation de l'effet de serre et le changement climatique associé seraient 1,5 fois plus rapides.

La dynamique des écosystèmes terrestres dépend des interactions de plusieurs cycles biogéochimiques, dont le cycle du carbone, les cycles des éléments nutritifs et le cycle de l'eau. Les forêts occupent un rôle clé dans le cycle du carbone, elles ont un mode de fonctionnement dynamique en recyclant le carbone. Les processus de photosynthèse, de respiration, de transpiration, de décomposition et de combustion entretiennent la circulation naturelle du carbone entre les écosystèmes et l'atmosphère. Le stock de carbone contenu dans les écosystèmes forestiers est très variable, il dépend des conditions climatiques et du type de sol notamment. Une partie importante de ce stock est contenue dans le sol.

Les activités humaines peuvent modifier les stocks et les échanges de carbone. Des émissions importantes de carbone ont été réalisées du fait du déboisement opéré depuis plusieurs siècles, aux latitudes moyennes et élevées et, dans la dernière partie du xx^e siècle, dans les régions tropicales. La déforestation tropicale est en effet aujourd'hui responsable de 20 % des émissions annuelles globales des gaz à effet de serre (GES). Cependant, les forêts se comportent globalement comme un puits de carbone : elles absorbent plus de carbone qu'elles n'en émettent. Le bilan annuel, à l'échelle mondiale, se situe autour de 1 milliard de tonnes de carbone séquestré par les écosystèmes forestiers, la déforestation étant prise en compte.

Les différents facteurs impactant les forêts, dont les changements climatiques eux-mêmes, rendent complexe toute analyse de l'effet « puits » des forêts et toute projection sur l'avenir. Il est en effet difficile

aujourd'hui d'évaluer de façon précise la part relative et l'impact probable dans l'avenir de facteurs tels que la concentration en CO₂ atmosphérique, les dépôts azotés, la température, les événements climatiques extrêmes, les incendies... Toutefois, les conclusions du dernier rapport du GIEC insistent sur le fait que le secteur forestier peut contribuer de façon importante aux efforts d'atténuation du réchauffement climatique. La forêt représente donc un double défi pour notre société en matière de lutte contre les changements climatiques, à la fois sous l'angle adaptation, mais également en matière d'atténuation de l'augmentation de l'effet de serre.

Mots clés

Forêt. Cycle du carbone.

Abstract

The global carbon cycle involves the earth's atmosphere, fossil fuels, the oceans, and the vegetation and soils of the earth's terrestrial ecosystems. The biosphere has played a major role in regulating Earth's climate : the terrestrial and ocean ecosystems act as buffers to maintain the global temperature in a habitable range. Within each biome, large additional variation exists resulting from local conditions and topography. Forests play a key role, they contain half of terrestrial ecosystems carbon, carbon is stored in trees but also mainly in soils.

Thanks to photosynthesis, trees in forests can produce their own organic compounds using carbon dioxide from the air or water in which they live. Most carbon leaves the biosphere through respiration. Burning of biomass can also transfer substantial amounts of carbon to the atmosphere. Terrestrial carbon dynamics are characterized by long periods of small rates of carbon uptake, interrupted by short periods of rapid and large carbon releases during disturbances. Overall, a forest comprising all stages in the stand life cycle operates as a functional system that removes carbon from the atmosphere, utilizing carbon in the stand cycle and exporting carbon as forest products.

* Chargée de mission effet de serre – Office national des Forêts (ONF – DEDD) – E-mail : Marianne.rubio@onf.fr

Human perturbations to the carbon cycle have been both direct and indirect. Deforestation in the tropics (Africa, Asia, and South America) is responsible for around 25% of the global emissions. Forest regrowth in the temperate zone and parts of the boreal zone leads to an increase in the carbon stocks in forest biomass. Forests globally act as carbon sinks by sequestering about 1 Gt of carbon/year. Recent studies improved the knowledge about the relative importance of the multiple interacting processes driving terrestrial carbon sources and sinks (CO₂ fertilization, nitrogen deposition, air pollution, climate change...) but large uncertainties remain.

How long the current carbon sink capacity of the terrestrial biosphere is likely to be maintained into the future is a matter of conjecture. Several major carbon stocks in terrestrial ecosystems are vulnerable to current climate change and/or land-use. The

capacity to partition natural, indirect, and direct human-induced effects on terrestrial carbon sources and sinks is necessary to be able to predict future terrestrial carbon dynamics and thus their influence on atmospheric CO₂ growth.

To conclude, as underlined in the IPCC Fourth Assessment Report (2007), the forestry sector can make a very significant contribution to a low-cost global mitigation portfolio that provides synergies with adaptation and sustainable development: "In the long-term, sustainable forest management strategy aimed at maintaining or increasing forest carbon stocks, while producing an annual yield of timber, fibre, or energy from the forest, will generate the largest sustained mitigation benefit".

Keywords

Forest. Carbon cycle.

Lexique

Adaptation

Politiques, stratégies, mesures, activités et pratiques adaptatives visant à réduire notre vulnérabilité aux impacts possibles du changement climatique. Les mesures d'adaptation sont les activités qui réduisent au minimum les impacts négatifs du changement climatique ou qui permettent de tirer profit du changement ; elles ne préviennent pas le changement climatique. Ces mesures peuvent être prises avant l'observation d'impacts (mesures préventives), ou après leur apparition (mesures correctives).

Atténuation

Politiques, stratégies, mesures, activités et pratiques visant à atténuer les changements climatiques. Des mesures d'atténuation sont nécessaires pour réduire le rythme et l'ampleur du changement climatique à l'échelle planétaire. Le dernier rapport du GIEC présente aux décideurs les différentes options possibles de réduction d'émissions dans les principaux secteurs économiques, à court, moyen et long termes, et précise leurs impacts et leurs coûts.

eqCO₂

Le CO₂ n'est pas le seul gaz à contribuer à l'effet de serre, mais c'est le principal ; les autres gaz sont donc exprimés en « équivalent CO₂ » selon leur pouvoir réchauffant.

GES

Les gaz à effet de serre absorbent une partie des rayons solaires en les redistribuant sous la forme de radiations qui rencontrent d'autres molécules de gaz, répétant ainsi le processus et créant l'effet de serre, d'où augmentation de la chaleur. Plus d'une quarantaine de gaz à effet de serre ont été recensés par le GIEC parmi lesquels figurent : la vapeur d'eau (H₂O), le dioxyde de carbone (CO₂), le méthane (CH₄), l'ozone (O₃), le protoxyde d'azote (N₂O), les hydrofluorocarbures (HFC), les perfluorocarbures (PFC) et l'hexafluorure de soufre (SF₆).

GIEC

Le Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat est composé d'environ 2 500 scientifiques travaillant sur la question des changements climatiques et publie de nombreuses études démontrant, notamment, qu'il y a une influence perceptible de l'activité humaine sur le climat global.

Gt ; Mt

Gt = Giga tonnes (milliard de tonnes) de carbone (GtC) ou de CO₂ (GtCO₂) ou d'équivalent CO₂ (Gt eqCO₂) ; Mt = Méga tonnes (million de tonnes).

1. Introduction

La forêt a fait l'objet de nombreux débats récemment, à la fois sur la scène politique au travers des négociations sur le changement climatique, mais également dans le domaine scientifique, avec en particulier la parution du quatrième rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC). Les écosystèmes forestiers exercent en effet un rôle dynamique dans le cycle du carbone : ils absorbent, stockent et relâchent cet élément, tout en approvisionnant le marché du bois avec un matériau écologique, et/ou un biocombustible. Ils exercent, à l'échelle mondiale, un rôle essentiel en tant que puits de carbone, tout comme les océans. L'objectif est ici de faire une synthèse des éléments de connaissance sur la séquestration du carbone dans les forêts, les différents facteurs impliqués, et l'évolution du bilan carbone des écosystèmes forestiers.

2. La forêt, un élément clé du cycle du carbone

2.2. Évaluation du stock de carbone en forêt

Les forêts recouvrent, au niveau mondial, un peu moins de 30 % de la surface terrestre, soit environ 4 milliards d'hectares (Figure 1).

La photosynthèse permet aux arbres de capter le CO₂ de l'atmosphère et de le transformer en molécules organiques grâce à l'énergie solaire. Deux tiers de la photosynthèse globale s'effectuent dans les écosystèmes forestiers. La photosynthèse des forêts recycle annuellement 5 % du CO₂ atmosphérique : sans les forêts, on estime, avec beaucoup d'incertitude, que la vitesse d'augmentation de l'effet de serre et le changement climatique associé seraient 1,5 fois plus rapides.

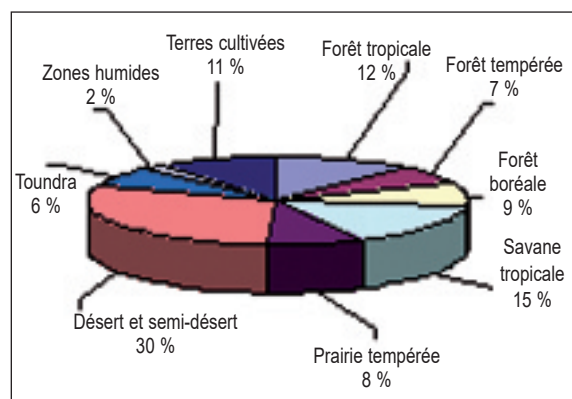
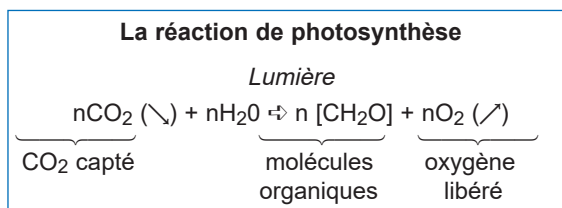


Figure 1.
Répartition de la surface terrestre par biome (en %) (IPCC, 2000 [1]).



Le carbone est notamment stocké dans les racines, le tronc et le houppier des arbres. Une partie du carbone capté retourne au sol suite à la chute des feuilles et grâce au bois mort. La durée de décomposition du bois mort peut être de plusieurs dizaines d'années, la proportion en volume de bois mort peut atteindre de 5 à 25 % dans les forêts naturelles, elle est estimée en France autour de 1,1 % du bois fort vivant par l'Inventaire Forestier National (Dupouey *et al.*, 2000 [2]). Le processus de décomposition de la litière libère du CO₂ dans l'atmosphère sous l'action de bactéries et de micro-organismes. Une partie du carbone est également transformée en composés organiques immobilisés dans les couches de l'humus ou bien transférés dans le sol.

Ainsi, le stock de carbone dans un écosystème forestier est constitué par le carbone des arbres vivants, du bois mort sur pied et au sol, de la végétation du sous-bois, de la litière et de la matière organique du sol. Le stock de carbone de la biomasse est très majoritairement situé dans la partie aérienne des arbres : les tiges représentent en moyenne 70 % du stock de la biomasse totale. Les arbres contiennent en moyenne une demi-tonne de carbone par tonne de bois sec.

Au niveau mondial, le stock de carbone dans les forêts dépend du type de forêt (tropicale, tempérée, boréale) et est également très variable pour un même biome. La part la plus importante du carbone stocké se situe dans les forêts boréales, suivie de près par les forêts tropicales. Les forêts tempérées apportent une contribution modeste (autour de 160 Gt de carbone), deux fois inférieure à la contribution des

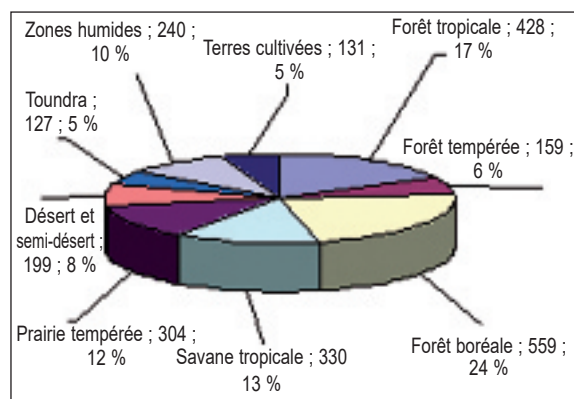


Figure 2.
Stocks globaux de carbone par biome (végétation et sol jusqu'à une profondeur de 1 m) (IPCC, 2000 [1]).

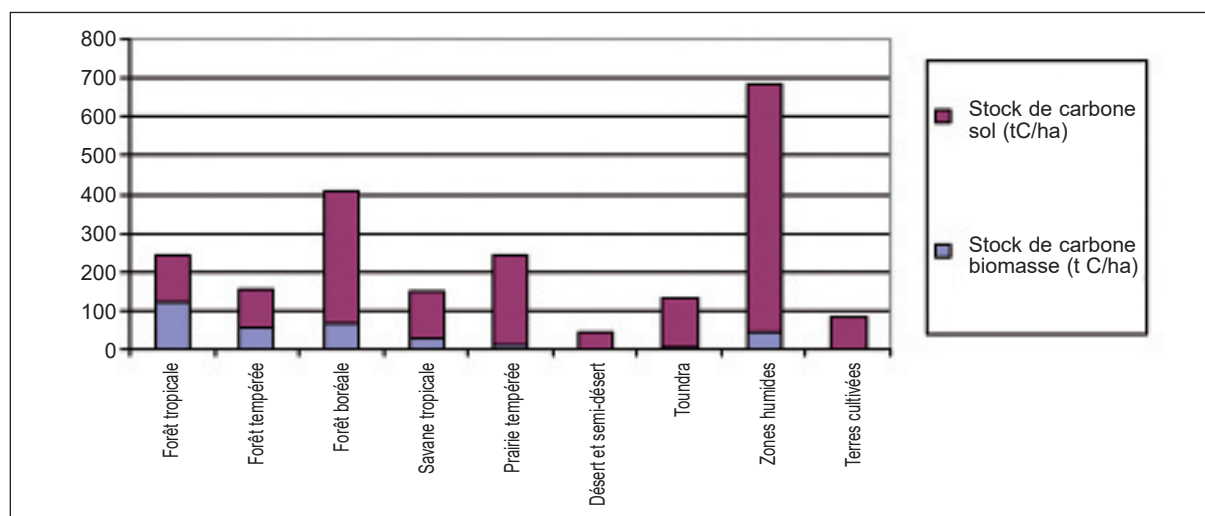


Figure 3. Stocks de carbone à l'hectare dans les bassins de carbone représentés par la végétation et le sol jusqu'à une profondeur de 1 m (IPCC, 2000 [1]).

prairies tempérées (Figure 2). À titre de comparaison, la forêt française représente un stock de carbone estimé à environ 860 Mt de carbone dans la biomasse et 1 140 Mt de carbone dans les sols (Dupouey *et al.* 2000 [2]).

Les résultats observés s'expliquent par la surface occupée par chacun des biomes (Figure 1), mais aussi par l'importance et la constitution du stock de carbone par hectare.

Le stock de carbone en forêt varie, en moyenne, entre 150 et 400 tC/ha, la valeur maximale étant pour la forêt boréale. Le carbone stocké dans le sol forestier occupe une part très importante : entre 50 % et 85 % du carbone total. Les forêts boréales contiennent un stock de carbone essentiel dans leurs sols. En moyenne le stock de carbone forestier est contenu à 70 % dans le sol, et à 30 % dans la biomasse, tout type de forêt confondu (Figure 3).

Les différences observées s'expliquent notamment par le fait que les stocks de carbone de la biomasse et du sol en forêt sont fortement influencés par le climat et par les conditions pédologiques.

En France métropolitaine, le stock de carbone dans la biomasse forestière est estimé entre 50-60 tC/ha, et le stock de carbone dans les sols forestiers autour de 35-80 tC/ha suivant les études (Liski *et al.* 2002 [3] ; Dupouey *et al.* 2000 [2]). Des études récentes ont conclu à un stock moyen dans la biomasse autour de 71 tC/ha, avec 76 tC/ha pour les peuplements feuillus et 62 tC/ha pour les peuplements résineux (CARBOFOR, 2004 [4]).

2.3. Forêt et carbone à l'échelle d'un peuplement

L'évolution de la séquestration du carbone dans un peuplement forestier est similaire quel que soit le type de peuplement : le stock augmente dans un premier temps avec l'âge puis il atteint son niveau de

saturation à un âge variable selon les essences et les conditions climatiques et pédologiques du site (Figure 4).

Une forêt en pleine croissance peut absorber de 3 à 10 tC/ha/an (Kowalski *et al.*, 2003, 2004 [5]).

Cette dynamique, couramment admise depuis les travaux de Olsson (Olsson *et al.*, 1996 [6]), suppose que les forêts âgées soient proches de l'équilibre et neutres vis-à-vis du carbone. Or, certaines études plus récentes tendraient à démontrer que la biomasse, en forêt tempérée ou boréale, continuerait d'augmenter dans les peuplements âgés pendant plusieurs siècles (Pregitzer & Euskirchen, 2004 [7]). Les forêts matures continueraient d'augmenter leur stock de carbone, tout particulièrement dans les sols et dans le compartiment racinaire.

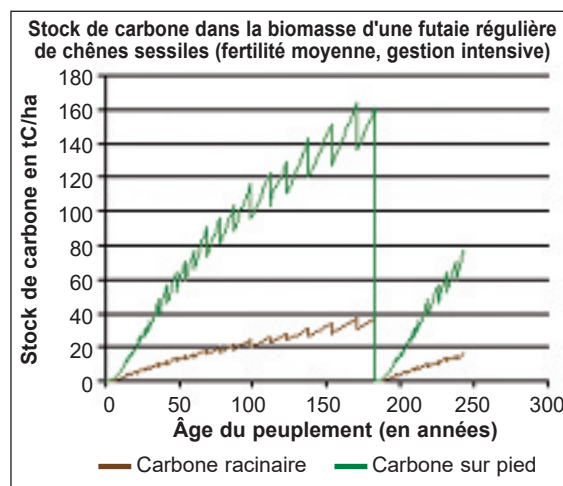


Figure 4. Évolution du stockage de carbone dans un peuplement de chêne sessile (Source : INRA 2008).

En conclusion, une forêt gérée durablement agit en tant que système efficace prélevant du CO₂ de l'atmosphère, tout en produisant du bois, un matériau qui permet de prolonger la séquestration du carbone, et également de limiter les émissions en se substituant à d'autres matériaux (tels que l'aluminium ou le béton) ou à des combustibles fossiles s'il est utilisé pour produire de l'énergie.

3. Le bilan net des forêts : un puits de carbone

3.1. La déforestation : une source importante d'émissions

Certaines perturbations de l'écosystème peuvent diminuer les stocks de carbone en forêts et entraîner des émissions de gaz à effet de serre. Ces perturbations peuvent être d'origine anthropique (déforestation, exploitation) ou naturelles (incendie, tempête, attaque phytosanitaire). Ainsi, des émissions importantes de carbone ont été réalisées du fait du déboisement opéré depuis plusieurs siècles, aux latitudes moyennes et élevées et, dans la dernière partie du xx^e siècle, dans les régions tropicales. La déforestation tropicale est en effet aujourd'hui responsable de 20 % des émissions annuelles globales des gaz à effet de serre d'origine anthropique. Elle induit chaque année l'émission de 1,6 Gt de carbone, et est responsable de près d'un tiers des émissions cumulées depuis 150 ans (Houghton, 1998 [8]).

3.2. Un bilan global qui tend vers un puits de carbone

Les émissions mondiales de gaz à effet de serre, majoritairement liées à l'utilisation de combustibles fossiles, sont partiellement compensées par deux puits : les forêts et les océans. Ainsi, l'augmentation de la quantité de CO₂ dans l'atmosphère est de 3,2 GtC/an sur la décennie 1990, alors que les émissions totales d'origine anthropique sont estimées autour de 8,0 GtC/an. Les océans agissent en tant que puits de carbone à hauteur de 2,2 GtC/an. Les écosystèmes terrestres, par déduction, séquestrent environ 2,6 GtC/an (Figure 5).

Ainsi, les écosystèmes terrestres, à l'échelle globale, absorbent du carbone plus qu'ils n'en émettent. Ils se comportent comme des « puits de carbone ». Le bilan net serait autour de 1 Gt C/an. Ces estimations comportent toutefois de très grandes incertitudes.

Les émissions liées à la respiration de la biomasse vivante, à la décomposition du bois mort et à l'ensemble des perturbations viennent se déduire de la quantité de carbone stockée par photosynthèse (Figure 6).

À l'échelle de la France, en 2005, en métropole, la forêt a fixé 19,4 millions de tonnes de carbone, dont 3 Mt sont issues de boisements âgés de moins de 20 ans, et les défrichements ont libéré autour de 1,6 Mt, soit un résultat total de 17,6 Mt de carbone fixées en métropole (source CITEPA/CORALIE format CCNUCC mise à jour décembre 2006).

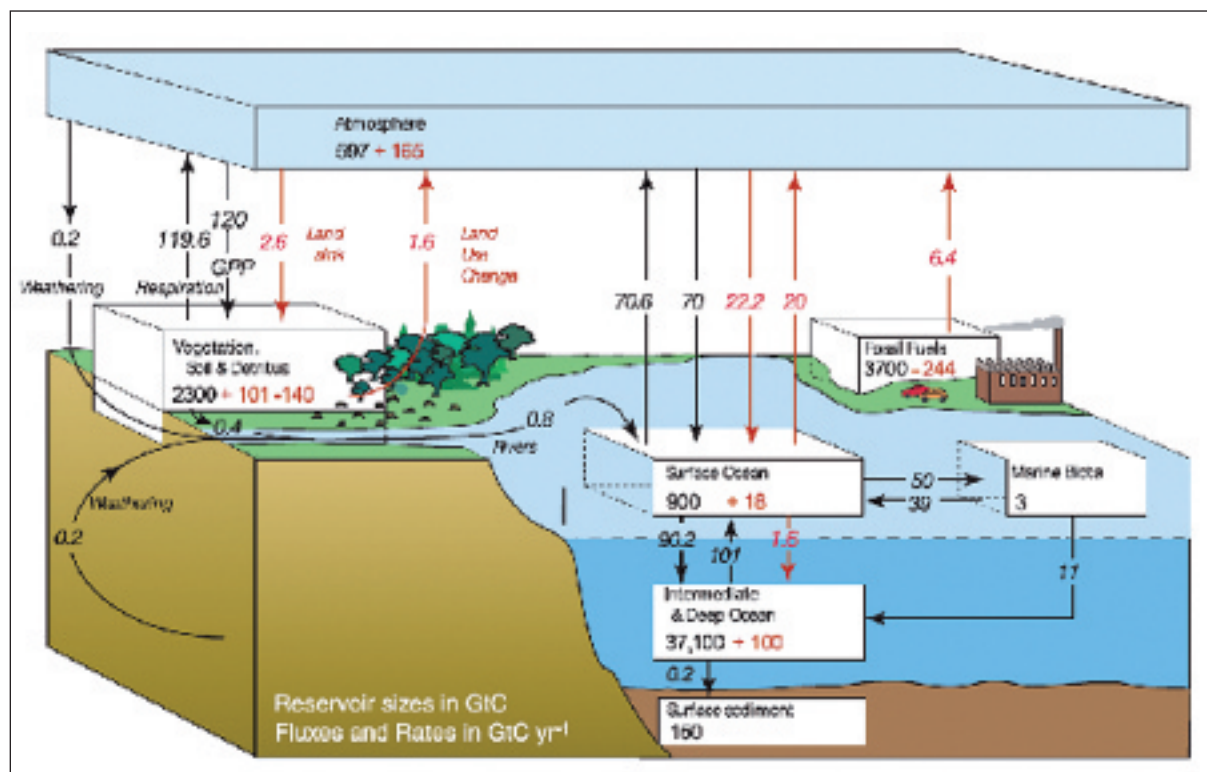


Figure 5. Cycle global du carbone pour les années 1990, présentant les principaux flux en GtC/an. (IPCC, 2007 [9]).

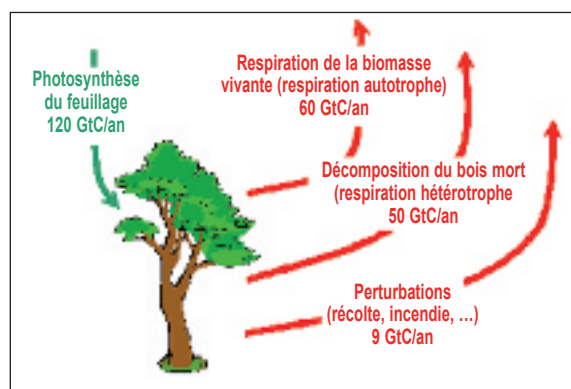


Figure 6.

Flux de carbone au niveau de la biomasse forestière pour les années 1990 (IPCC, 2001 [10]).

3.3. Un puits de carbone difficile à localiser

Plusieurs travaux suggèrent actuellement que la biomasse des forêts tempérées ainsi que le compartiment détritique des forêts boréales (litière, gros débris morts, humus) sont en accroissement, ce qui expliquerait une bonne partie de l'effet puits observé. Cependant, la distribution de ce puits de carbone de l'hémisphère Nord entre l'Amérique du Nord et l'Eurasie ne fait pas l'objet d'un consensus dans la communauté scientifique.

L'impact des forêts tropicales sur le bilan global des forêts est encore mal connu. Les forêts primaires tropicales ont été considérées pendant de nombreuses années comme étant neutres vis-à-vis du carbone, c'est-à-dire à l'équilibre. L'impact des forêts tropicales se limitait donc en grande partie à des émissions importantes liées à la déforestation. Or, certaines études récentes estiment que les forêts tropicales absorberaient des quantités de carbone plus importantes que prévues, ce qui remettrait en cause la distribution du puits de carbone forestier entre les écosystèmes tempérés et tropicaux (Stephens *et al.*, 2007 [11]). L'une des explications pourrait être l'effet « fertilisation » lié à l'augmentation de la concentration en CO₂ de l'atmosphère, particulièrement développé sous les tropiques où les disponibilités en eau et en nutriments sont importantes (Ciais *et al.*, 2005 [12]). Toutefois des études complémentaires sont nécessaires afin de mieux appréhender l'effet puits des forêts tropicales.

3.4. Des composantes multiples à « l'effet puits »

Différents facteurs d'origine naturelle, anthropique directe voire indirecte impactent les écosystèmes terrestres. L'accroissement de la production primaire nette des forêts de l'hémisphère Nord a des causes directes comme le déficit de récolte des forêts européennes, l'amélioration des pratiques sylvicoles, l'extension des surfaces boisées ou le vieillissement

des peuplements. Des causes indirectes comme les dépôts azotés, l'allongement de la saison de végétation dû au réchauffement, ou bien le rôle dopant du CO₂ atmosphérique sont également à prendre en compte (Canadell *et al.*, 2007 [13]).

Certaines études suggèrent que l'un des facteurs principaux expliquant le puits de carbone forestier dans certaines régions est la conversion naturelle de terres agricoles abandonnées en forêts, l'efficacité des mesures de lutte contre les incendies, et également des changements dans la périodicité des attaques de ravageurs (Caspersen *et al.*, 2000 [14] ; Hurtt *et al.*, 2002 [15]). En France, par exemple, la forêt a gagné en superficie, de l'ordre de 73 000 ha par an en métropole entre 1984 et 1996.

Cependant, une étude récente, centrée sur les forêts boréales et tempérées, a montré qu'une partie importante de la variabilité de la séquestration du carbone est liée à la dynamique du peuplement suite aux perturbations (incendie, récolte de bois), et qu'en second lieu, l'effet puits s'expliquait grâce aux dépôts azotés (Magnani *et al.*, 2007 [16]). Cette étude insiste ainsi sur l'importance de la répartition en classe d'âge des peuplements forestiers et conclut sur le fait que « l'homme contrôle, en définitive, le bilan carbone des forêts tempérées et boréales, de façon directe (au travers de la gestion forestière) ou indirecte (de par les dépôts azotés) ».

Les dépôts azotés jouent donc un rôle beaucoup plus important que prévu, particulièrement dans certaines régions d'Europe et à l'est des États-Unis. La combustion d'énergie fossile, de biomasse et la volatilisation d'azote à partir de sources organiques ou non organiques lors de la fertilisation agricole aboutissent à des émissions importantes d'azote. Ces dépôts azotés ont un effet fertilisant sur la croissance des arbres.

L'augmentation de la concentration de CO₂ dans l'atmosphère, qui s'observe depuis le début de l'ère industrielle, agit également comme un fertilisant et augmente l'efficacité du puits de carbone forestier. Cependant cet effet n'est pas uniforme selon les écosystèmes considérés, son importance et sa distribution spatiale sont encore largement débattus (Morgan *et al.*, 2004 [17] ; Korner *et al.*, 2005 [18]). Il aurait notamment une amplitude importante au niveau des tropiques (Ciais *et al.*, 2005 [19]), et expliquerait 50 % du puits sibérien, mais seulement 10 % du puits européen (Canadell *et al.*, 2007 [13]), du fait de la présence d'autres facteurs limitants tels que l'eau ou les nutriments.

A contrario, la pollution de l'air par différents polluants relâchés dans l'atmosphère peut impacter les forêts. Des polluants primaires tels que le SO₂ ou le HF peuvent pénaliser le bilan carbone des écosystèmes forestiers à une échelle très souvent locale, alors que des polluants secondaires tels que l'ozone troposphérique peuvent engendrer des effets négatifs de plus grande envergure (Percy *et al.*, 2007 [20]).

3.5. Une évolution du bilan carbone des forêts difficile à prévoir

Même si l'impact relatif de chacun des différents facteurs ayant une action sur le bilan carbone des forêts est difficile à évaluer, des progrès ont été faits ces dernières années et permettent de construire des scénarios.

Dans un proche avenir, le puits de carbone forestier devrait se maintenir, durant plusieurs décennies au moins, grâce à la fertilisation CO₂, l'effet dépôts azotés arrivant à saturation dans certaines régions (Canadell *et al.*, 2007 [13]). Une étude récente (Ciais *et al.*, 2008 [20]) montre, au travers d'une analyse des données issues des inventaires forestiers européens entre 1950 et 2000, un lien très étroit entre l'augmentation de la biomasse forestière et la productivité des écosystèmes forestiers. Elle conclut sur la possibilité, en Europe, de continuer à séquestrer du carbone dans les forêts européennes pendant des décennies, tout en fournissant du matériau bois.

Cependant, certains modèles d'écosystème montrent, au niveau mondial, que cette absorption devrait diminuer graduellement et que les écosystèmes forestiers pourraient devenir par la suite des sources de carbone. La cause principale de ce retournement de situation pourrait être le changement climatique lui-même (augmentation de l'intensité et/ou des événements climatiques extrêmes, augmentation du risque incendie...). Ainsi, par exemple, l'augmentation de la température entraîne une hausse de l'activité de décomposition de la matière organique des sols, qui peut annuler dans certaines régions, notamment boréales, l'effet bénéfique de la hausse de la productivité primaire. Toutefois, toute projection au-delà de quelques décennies comporte

de grandes incertitudes, compte tenu notamment de l'imprécision des connaissances sur les différents processus en jeu et leurs multiples interactions.

4. Conclusion

L'absorption nette de carbone par les écosystèmes terrestres, qui permet de compenser les émissions issues de la déforestation tropicale, est la résultante d'une combinaison de différents facteurs (conversion des terres agricoles, gestion sylvicole, mais aussi fertilisation par le CO₂ atmosphérique, dépôts azotés...). Il est actuellement très difficile de déterminer l'importance relative de ces différents processus qui varient d'une région à l'autre, et d'appréhender leurs interactions multiples. Cet équilibre reste fragile, le 4^e rapport du GIEC publié en 2007 souligne en effet le fait que la résilience de nombreux écosystèmes pourrait être affectée du fait du changement climatique (IPCC, 2007 [9]).

Cependant, les conclusions de ce même rapport ont mis en avant le fait que « les activités d'atténuation dans le secteur forestier peuvent réduire considérablement les émissions des sources et augmenter l'absorption du CO₂ par les puits pour des coûts faibles en synergie avec l'adaptation et la gestion durable ». « Sur le long terme, une stratégie de gestion durable des forêts visant à maintenir ou à augmenter le stock de carbone en forêt tout en approvisionnant la filière bois (grume, fibre et énergie) à un niveau de prélèvement durable, générera les bénéfices d'atténuation maximum. ».

La forêt représente donc un double défi pour notre société en matière de lutte contre les changements climatiques, à la fois sous l'angle adaptation, mais également en matière d'atténuation de l'augmentation de l'effet de serre.

References

- [1] Watson RT, Noble IR, Bolin B, Ravindranath NH, Verardo DJ, Dokken DJ. Land Use, Land Use Change and Forestry – IPCC Special Report. IPCC Publisher, Cambridge University Press 2000 : 377 p.
- [2] Dupouey JL, Pignard G, Badeau V *et al.* Stocks et flux de carbone dans les forêts françaises. *Revue Forestière Française*, n° spécial 2000 : 139-54.
- [3] Liski J, Perruchoud D, Karjalainen T *et al.* Increasing carbon stocks in the forest soils of western Europe. *Forest Ecology and Management* 2002 ; 169 : 159-75.
- [4] Lousteau D, Granier A, Balesdent J *et al.* Rapport final du projet CARBOFOR – Séquestration de carbone dans les grands écosystèmes forestiers en France. Quantification, spatialisation, vulnérabilité et impacts de différents scénarios climatiques et sylvicoles. Programme GICC 2001 – Convention Gi ECOFOR n° 3/2001, 2004 : 138 p.
- [5] Kowalski AS, Loustau D, Berbigier P *et al.* Paired comparisons of carbon exchange between undisturbed and regenerating stands in four managed forests in Europe. *Global Change Biology* 2004 ; 10 (10) : 1707-23.
- [6] Olsson B, Staaf H, Lundkvist H *et al.* Carbon and nitrogen in coniferous forest soils after clear-felling and harvests of different intensity. *Forest Ecology and Management* 1996 ; 19-32.
- [7] Pregitzer E, Euskirchen S. Carbon cycling and storage in world forests: biome patterns related to forest age. *Global Change Biol* 2004 ; (10) : 2052.
- [8] Houghton RA. Historic role of forests in the global carbon cycle. In: Kohlmaier GH, Weber M, Houghton RA. Carbon Dioxide Mitigation in Forestry and Wood Industry ; 1998 ; 1-24.
- [9] IPCC Fourth Assessment Report.
 - Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Solomon S, Qin D, Manning M, Chen Z, Marquis M, Averyt KB, Tignor M, Miller HL (eds)). IPCC : Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment. Cambridge University Press ; 2007 : 996 p.
 - Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Parry ML, Canziani OF, Palutikof JP, Van Der Linden PJ (eds)). IPCC : Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment. Cambridge University Press ; 2007 : 976 p.
 - IPCC, 2007: Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Metz B, Davidson OR, Bosch PR, Dave R, Meyer LA (eds)), Cambridge University Press ; 2007 : 851p.
- [10] IPCC Third Assessment Report
 - Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Houghton JT, Ding Y, Griggs DJ, Noguer M, Van Der Linden PJ, Dai X, Maskell K, Johnson CA (eds.)). IPCC : Climate Change 2001. The scientific basis. Contribution of Working Group I to the third assessment report of the IPCC. Cambridge University Press ; 2001 : 881 p.
- [11] Stephens B, Gurney K, Tans P *et al.* Weak Northern and Strong Tropical Land Carbon Uptake from Vertical Profiles of Atmospheric CO₂. *Science* 2007 ; 316 : 1732-5.
- [12] Ciais P, Janssens I, SA *et al.* The potential for rising CO₂ to account for the observed uptake of carbon by tropical, temperate, and boreal forest biomes. In: Griffiths H, Jarvis PG (Eds.). The Carbon Balance of Forest Biomes ; 2005.
- [13] Canadell J, Kirschbaum M, Kurz W *et al.* Factoring out natural and indirect human effects on terrestrial carbon sources and sinks. *Environmental Science and Policy* 2007 ; 10 : 370-84.
- [14] Caspersen JP, Pacala SW, Jenkins JC *et al.* Contributions of land use history to carbon accumulation in U.S. forests. *Science* 2000 ; 290 : 1148-51.
- [15] Hurtt GC, Pacala SW, Moorcroft PR *et al.* Projecting the future of the US carbon sink. *Proc. National Academy of Science* 2002 ; 99 : 1389-94.
- [16] Magnani F, Mencuccini M, Borghetti M, *et al.* The human footprint in the carbon cycle of temperate and boreal forests. *Nature* 2007 ; 447 : 848-50.
- [17] Morgan JA, Pataki DE, Körner C *et al.* Water relations in grassland and desert ecosystems exposed to elevated atmospheric CO₂. *Oecologia* 2004 ; 140 : 11-25.
- [18] Körner C, Asshoff R, Bignucolo O *et al.* Carbon Flux and Growth in Mature Deciduous Forest Trees Exposed to Elevated CO₂. *Science* 2005 ; 309 : 1360-2.
- [19] Percy KE, Nosal M, Heilman W *et al.* New exposure-based metric approach for evaluating O₃ risk to North American aspen forests. *Environ Pollut* 2007 ; 147 : 554-66.
- [20] Ciais P, Schelhaas MJ, Zaehle S *et al.* Carbon accumulation in European forests. *Nature geoscience* 2008 ; 1 : 1-5.