Rôle des forêts dans le bilan de carbone de la planète

Auteurs :
WIGNERON Jean-Pierre, Directeur de Recherches INRAe, UMR « Interactions Sol Plante Atmosphère » (ISPA), INRAe et Bordeaux Sciences Agro, Villenave d'Ornon
CIAIS Philippe, Directeur de recherche au CEA, Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement LSCE (CNRS/CEA/CEA, UVSQ - Université Paris-Saclay), Institut Pierre Simon Laplace ; Membre de l'Académie des sciences

03-05-2023

À l'échelle de la planète, les forêts constituent le principal puits de carbone en milieu continental. Cependant, à une échelle plus locale, si certaines forêts constituent bien des puits de carbone, d'autres jouent le rôle de sources. Le flux net de carbone dépend en effet de différents facteurs naturels et anthropiques. En particulier, les activités humaines peuvent aussi bien favoriser le stockage de carbone (protection et expansion des surfaces de forêts, effet fertilisant du CO_2 libéré par les activités humaines) qu'au contraire en provoquer la libération (déforestation, dégradations).

1. Les forêts dans le bilan global de carbone

Figure 1. Automne dans une hêtraie sapinière du Jura (Lac Genin, Haut-Bugey, Ain) ; les feuilles tombent et vont contribuer à la formation de la litière. [Source : Photo © Jacques Joyard]

L'augmentation de la concentration des gaz à effet de serre dans l'atmosphère terrestre contribue au réchauffement climatique. Le dioxyde de carbone (CO_2) constitue l'un des principaux gaz à effet de serre et est responsable actuellement de l'ordre de 60 à 80 % de l'effet de serre d'origine anthropique. La **concentration du CO_2 dans l'atmosphère** a fortement **augmenté** durant l'ère préindustrielle **à cause des émissions liées à la déforestation** principalement, puis suite à la révolution industrielle avec des **émissions liées aux combustibles fossiles** (principalement le charbon, les produits pétroliers et le gaz naturel). Cette concentration est passée de l'ordre de 278 ppm en 1750 à 410 ppm en 2019. Actuellement, elle augmente d'environ 2,4 ppm par an (Lire Focus Carbone et biomasse des forêts).

La forêt est, selon la définition de la FAO [1], une surface caractérisée par un taux de couverture des arbres supérieur à 10 % et une hauteur des arbres supérieure à 5 mètres.

Les **forêts** représentent un immense **stock de carbone** via *(i)* la **biomasse**, *(ii)* le **carbone du sol** (sous forme de matière organique et de minéraux carbonatés), *(iii)* le **bois mort** et *(iv)* la **litière** (la fine couche de matière organique morte située au-dessus du sol). Ce stock évolue en fonction de facteurs naturels (morts des arbres anciens ou malades, croissance des autres) et anthropiques (déforestation, plantations) (Figure 1). Lorsque le stock de carbone emmagasiné dans la forêt augmente, la forêt constitue un « puits de carbone », tandis que si son stock diminue car le carbone est relâché dans l'atmosphère, elle constitue une « source de carbone ». Selon les régions, la forêt peut constituer une source ou un puits de carbone. Par exemple la déforestation tropicale conduit à une émission importante de CO_2 dans l'atmosphère, alors que la croissance des arbres contribue au contraire à capter le CO_2 atmosphérique.

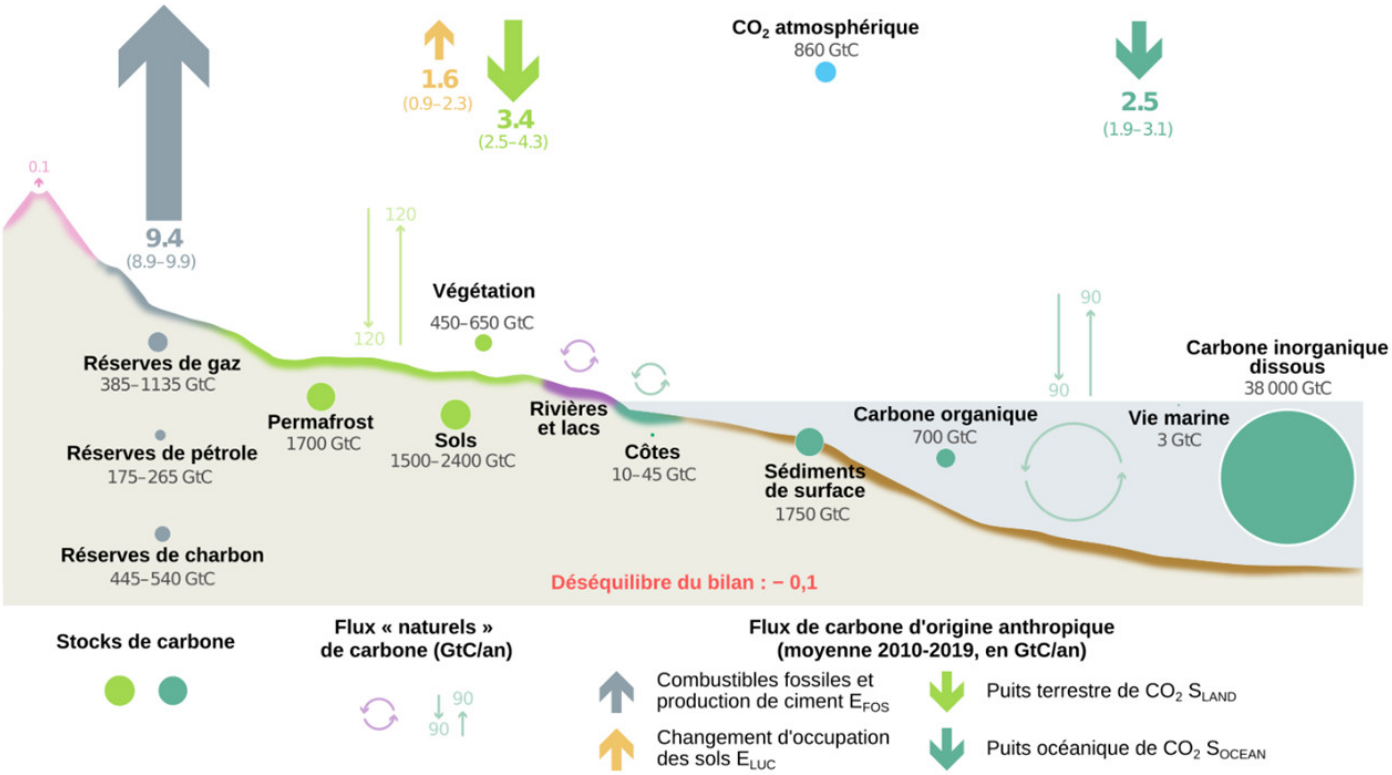

Figure 2. Cycle global du carbone. Les stocks de carbone sont représentés par des ronds tandis que les flux de carbone sont figurés par des flèches de différentes couleurs. Rose : volcanisme ; gris : combustibles fossiles et production de ciment ; jaune : changements d'occupation des sols (déforestation principalement) ; vert clair : flux net correspondant à la photosynthèse ; bleu-vert : flux net correspondant à la dissolution du carbone atmosphérique dans les océans. [Source : Friedlingstein et coll., ref. [2], traduit et adapté par Pascal Combemorel Licence : CC-BY 4.0 Source : Earth System Science Data]

Le projet GCP (*Global Carbon Project* [2],[3]) établit chaque année un bilan des flux de carbone sur Terre. Ce projet s'intéresse en particulier aux émissions de carbone d'origine anthropique et aux flux qui en résultent entre les différents réservoirs de carbone de la Terre (surfaces terrestres, océan et atmosphère). Nous listons à la suite ces différents termes avec leur estimation sur la dernière décennie (2010-2019) et l'incertitude associée (± 1σ) (Figure 2) :

Les **émissions** de CO_2 liées à l'**utilisation** des **combustibles fossiles** et à la **production de ciment** ($E_{FOS} \approx 9{,}4 \pm 0{,}5$ GtC/an). Si on estime la population de la planète à 8 milliards d'individus, cela représente une émission d'environ 1,2 tonnes de carbone par personne par an, avec cependant, dans la réalité, une très forte disparité selon les pays.

Les **émissions** liées **aux changements d'occupation des sols**, principalement la **déforestation** ($E_{LUC} \approx 1{,}6 \pm 0{,}7$ GtC/an). Ces émissions sont incertaines et estimées avec des modèles d'inventaire (*book-keeping* [4]) à partir des surfaces de forêt perdues ou gagnées.

Les **puits de CO_2 terrestre** ($S_{LAND} \approx 3{,}4 \pm 0{,}9$ GtC/an) et **océanique** ($S_{OCEAN} \approx 2{,}5 \pm 0{,}6$ GtC/an), estimés à partir d'un ensemble de modèles numériques 3D du cycle du carbone dans l'océan, et à partir d'un ensemble de modèles diagnostiques estimant les flux air-mer à partir de nombreuses mesures *in situ* de la pression partielle du CO_2 à la surface des océans (SOCAT).

Au niveau de l'atmosphère, la différence entre les flux de carbone entrants ($E_{FOS} + E_{LUC} = 9{,}4 + 1{,}6 = 11{,}1$ GtC/an) et sortants ($S_{OCEAN} + S_{LAND} = 2{,}5 + 3{,}4 = 5{,}9$ GtC/an) conduit à une accumulation de 5,1 GtC/an. Ainsi, sur les 9,4 GtC/an libérées par les activités humaines, 5,1 GtC/an sont stockées dans l'atmosphère, soit 55 % des émissions.

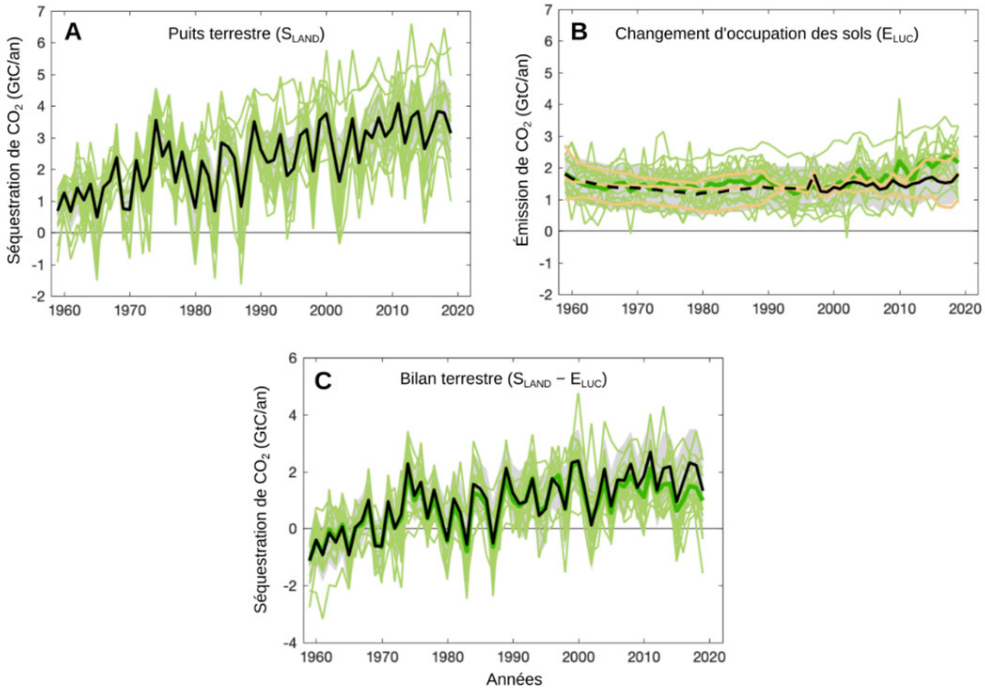

Figure 3. Évolution temporelle des échanges de CO_2 entre l'atmosphère et la biosphère terrestre. A. Puits de carbone des surfaces terrestre (S_{LAND}). B. Émissions liées aux changements d'occupation des sols, principalement la déforestation (E_{LUC}). C. Puits de carbone terrestre résiduel ($S_{LAND} - E_{LUC}$), de l'ordre de 1,8 GtC/an. La ligne noire correspond aux valeurs utilisées dans le Global Carbon Project (voir Fig. 1). Les lignes vert clair représentent les résultats de différents modèles DGVM (dynamic global vegetation model), qui simulent les changements de la végétation en réponse aux changements du climat. La ligne vert foncé présente la moyenne de l'ensemble de ces modèles. Dans la figure B, les lignes jaunes correspondent à des modèles d'inventaire, qui estiment les surfaces de forêts et leur biomasse à partir d'inventaires réalisés dans les forêts de différents pays. [Source : Friedlingstein et coll., ref. [2], traduit et adapté par Pascal Combemorel Licence : CC-BY 4.0 Source : Earth System Science Data]

Au niveau des continents, la différence entre flux entrant (S_{LAND} = 3,4 GtC/an) et sortant (E_{LUC} = 1,6 GtC/an) signifie que les surfaces continentales stockent chaque année 3,4 – 1,6 = 1,8 GtC/an, soit l'équivalent de 20 % des émissions anthropiques de carbone. Enfin, les océans absorbent 25 % du carbone libéré par les activités humaines (voir également Figure 4).

Les forêts capteraient, selon les estimations, entre 70 et 100 % des 1,8 GtC/an absorbés au niveau des surfaces continentales. Les surfaces non forestières (prairies, cultures, toundra, etc.) capteraient donc entre 0 et 30 % de ces 1,8 GtC/an. L'incertitude sur les contributions relatives des forêts et des zones non forestières dans le piégeage du CO_2 traduit le fait que différentes méthodes, avec leurs incertitudes associées, sont employées pour estimer les stocks de carbone et leurs variations et qu'elles ne convergent pas vers les mêmes résultats. Quoi qu'il en soit, les forêts constituent le principal puits de carbone en milieu continental. En outre, elles représentent également une source de carbone via la déforestation. Comprendre le rôle des forêts dans le cycle du carbone est donc essentiel pour pouvoir faire face au réchauffement climatique.

L'impact de la déforestation (E_{LUC}) est assez stable, mais plutôt en augmentation ces dernières années (Figure 3). Le puits terrestre (S_{LAND}) augmente, possiblement en lien avec les efforts de replantation et les effets fertilisant du CO_2, mais il a tendance à stagner ces dernières années. Le puits de carbone terrestre résiduel total ($S_{LAND} - E_{LUC}$) est à peu près stable sur les deux dernières décennies (Figure 3).

Avant de nous intéresser aux changements de stocks de carbone, qu'ils soient positifs (forêt = puits) ou négatifs (forêt = source), considérons au préalable la répartition de ces stocks à l'échelle de la planète.

2. Répartition des stocks de carbone de la forêt

Les **stocks** de **carbone** de la **forêt** correspondent au stock de carbone présent **dans la végétation** (parties aériennes et souterraines), **le sol, le bois mort et la litière**. Les forêts couvrent la planète sur environ 3 900 millions d'hectares et se répartissent dans trois grands domaines géographiques : tropical pour 50 % environ (2 000 Mha), boréal (1 100 Mha) et tempéré (750 Mha) [5] (voir Table S2 de cette réf. [5]).

Selon une étude publiée en 2011 par Yude Pan et ses collaborateurs [5], les stocks des forêts de la planète sont de l'ordre de 860 GtC, dont 380 PgC (44 %) dans le sol (jusqu'à environ un mètre de profondeur), 360 GtC (42 %) dans la biomasse vivante (aérienne et souterraine), 75 GtC (9 %) dans le bois mort, et 45 GtC (5 %) dans la litière. Géographiquement, la forêt tropicale représente plus de la moitié des stocks (470 GtC, 55 %) et le reste du stock est reparti dans la forêt boréale (270 GtC, 32 %) et

tempérée (120 GtC, 14 %) (Figure 4).

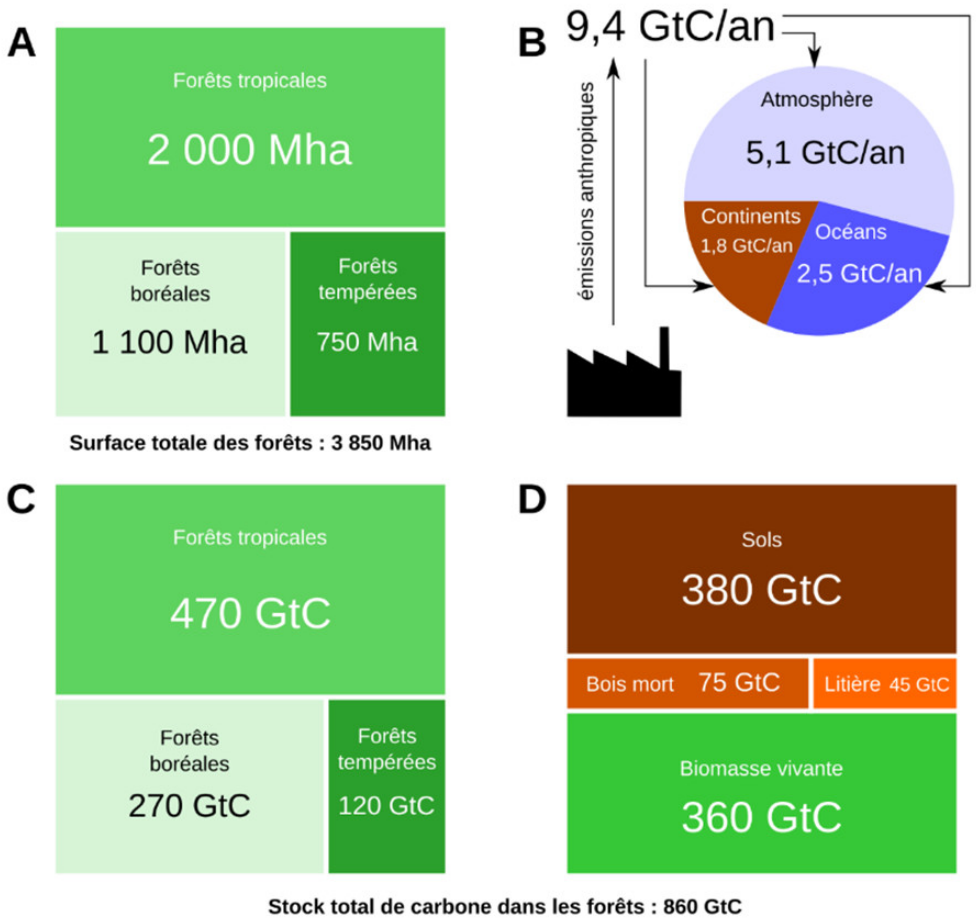

Figure 4. Flux et stocks de carbone au niveau des forêts. A. Surface de forêts par types de forêts. B. Flux de carbone d'origine anthropique (combustibles fossiles et production de ciment) et séquestration par l'atmosphère, les continents et les océans. C. Stock de carbone par type de forêts. D. Stock de carbone par type de composant des forêts. [Source des données : A, C et D : Pan et coll., ref [5] ; B : Friedlingstein et coll., ref. [2]. Auteur : Pascal Combemorel, Planet Vie, Licence : CC-BY]

La densité des stocks est similaire dans les forêts tropicales et boréales (242 contre 239 MgC.ha^{-1} ou tonne C.ha^{-1}), mais elle est plus faible de 60 % dans les forêts tempérées (environ 150 MgC.ha^{-1}ou tonne C.ha^{-1}). Il faut noter une différence fondamentale dans la structure des stocks de carbone dans les forêts tropicales et boréales. Dans les forêts tropicales, les stocks se localisent principalement dans la biomasse (56 %) contre 32 % pour le sol alors que, dans les forêts boréales, ils sont principalement dans le sol (60 %) contre 20 % pour la biomasse. Ainsi, si l'on ne considère que la biomasse vivante (aérienne et souterraine), sur un total de 360 GtC, les tropiques représentent environ 70 % (260 GtC) des stocks de carbone des forêts de la planète, dont à peu près 40 % (140 GtC) pour la seule partie tropicale américaine et 25 % (93 GtC) en considérant uniquement la biomasse aérienne vivante de l'Amazonie (Figure 5) [6].

Comme précisé ci-avant, le stock de carbone des forêts change en fonction du climat, des activités humaines, etc. et ces changements peuvent être positifs (le carbone s'accumule dans la forêt, on parle alors de puits) ou négatifs (on parle alors de source). Considérons les principaux facteurs à l'origine de ces changements qu'ils soient positifs ou négatifs.

3. Augmentation du stock : la forêt comme puits de carbone

La photosynthèse convertit le carbone minéral de l'atmosphère en carbone organique qui s'accumule alors dans les arbres (feuilles, branches, troncs, racines) et dans le sol lorsque la forêt pousse. Si la forêt est en équilibre depuis de très nombreuses années (des siècles), les pertes de carbone liées à la mortalité des arbres les plus vieux ou dépérissant sont plus ou moins compensées par la pousse des jeunes arbres (voir section 3.1 spécifique au sujet des forêts anciennes et intactes) et les forêts anciennes peuvent donc être des puits ou des sources, mais de faible intensité par unité de surface.

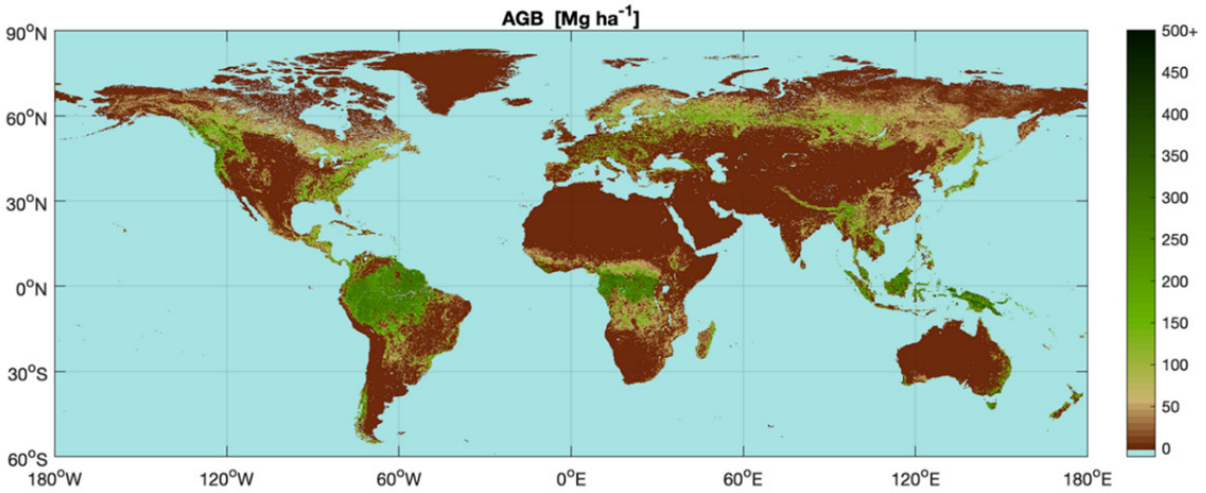

Figure 5. Carte globale de la biomasse aérienne (AGB, aboveground biomass, en Mg/ha) estimée à partir d'observations de télédétection optique et radar. [Source : Santoro et coll., 2020 Licence : CC-BY Source : Earth System Science Data].

Même si la biomasse totale (aérienne et souterraine) d'une forêt reste relativement stable, la forêt peut accumuler du carbone dans la couche de litière qui peut alimenter le réservoir de carbone du sol sur le long terme. Ainsi, la couche de litière et le sol représentent des termes importants du bilan de carbone des forêts boréales, car le taux de décomposition y est faible.

Suivant Pugh *et coll.* [7], nous distinguons les forêts en deux grandes classes *(i)* les forêts de repousse et *(ii)* les forêts anciennes et intactes (définies par un âge supérieur à 140 ans). Ces auteurs estiment un puits de carbone de 1,30 GtC/an pour les forêts de repousse et de 0,85 GtC/an pour les forêts anciennes. Au total, ils estiment donc un puits global des forêts de l'ordre de 2,15 GtC/an, dont l'ordre de grandeur est comparable à celui du puits terrestre résiduel (1,8 GtC/an) estimé par le *Global Carbon Project*.

3.1. Forêts anciennes et intactes en pseudo-équilibre

Ces forêts correspondent à des forêts qui n'ont subi (en théorie) aucune intervention humaine depuis de nombreuses décennies : elles sont supposées relativement « intactes ». Il s'agit essentiellement des forêts tropicales, soit protégées, soit encore relativement inaccessibles aux activités humaines.

Dans une forêt très ancienne, en pseudo-équilibre avec son environnement, le stock de carbone reste relativement stable, ou alors, dans certaines conditions précises, augmente lentement avec une accumulation de carbone dans le sol. En effet, l'accumulation de carbone lors de la pousse des arbres est compensée par l'émission de carbone liée à la décomposition du bois mort et de la litière (via la respiration autotrophe dans la litière et le sol), qui résulte de la chute des feuilles, des branches et d'une mortalité naturelle des arbres les plus vieux (renouvellement de la biomasse). La décomposition des débris de bois mort n'étant pas instantanée, les émissions de carbone dans l'atmosphère liées à la mortalité des arbres ne sont pas immédiates : il y a un effet tampon lié à cette décomposition sur plusieurs années [3], [8].

Figure 6. La forêt de Białowieża est l'une des dernières forêts primaires d'Europe, à cheval sur les territoires polonais et biélorusse. Formée il y a dix mille ans, lors de la dernière glaciation, elle est restée à l'écart de la plupart des influences humaines. [Source : Photo © Frank Vassen, (CC BY 2.0), Białowieża National Park, Pologne, via Flickr].

Mais un équilibre existe-t-il vraiment dans les forêts intactes et anciennes (Figure 6) ? En réalité, il est probable que dans la plupart des cas, mêmes ces forêts subissent des perturbations. Ces dernières correspondent en particulier à l'effet fertilisant du CO_2 (et dans une moindre mesure à l'effet des dépôts atmosphériques d'autres éléments tels que l'azote), à l'augmentation des températures, et à la modification des régimes de pluie. L'effet fertilisant du CO_2 sur la croissance de la biomasse des arbres est bien montré par les modèles ainsi que par des expérimentations *in situ*, et selon des auteurs, il expliquerait une large partie du puits de carbone des forêts à l'échelle globale. Ce puits serait de l'ordre de 1,2 GtC/an sur 1990–2007 sur les tropiques selon des données d'inventaire *in situ* [5]. Cependant, compte tenu des difficultés à estimer le puits de carbone des forêts sur de vastes surfaces, rien n'est encore bien établi dans la communauté scientifique à une échelle continentale.

Ainsi, un article très cité de Luyssaert *et coll.* [9] remet en cause l'idée que les forêts anciennes (*old-growth*) soient neutres sur un plan carbone. Ils estiment à partir de quelques sites que les forêts anciennes et intactes des régions tempérées et boréales constituent un puits de carbone important (environ 4,6 GtC/an). Cette valeur serait fortement surestimée selon Gundersen *et coll.* [10], qui proposent celle de 1,6 GtC/an pour les forêts anciennes (> 200 ans) de ces régions. Cette seconde estimation reste élevée, car elle est du même ordre de grandeur que le puits global terrestre (cf. section 1), et ne tient pas compte des pertes par les feux et les insectes. Par ailleurs, Pugh *et coll.* [8] estiment qu'il y a très peu de forêts anciennes dans les régions tempérées et boréales, ce qui confirme que les résultats de Luysseart et de ses collaborateurs seraient fortement biaisés par l'inclusion de forêts « gérées » dans leur étude [10].

Citons aussi deux études récentes de référence sur les tropiques qui incluent la plus grande partie des forêts « intactes ». Brienen *et coll*. [11], s'appuyant sur une base de données *in situ* très large sur des sites « intacts », constatent que la forêt d'Amazonie est bien un puits de carbone mais que ce puits est en déclin, en lien avec une diminution de la productivité et une augmentation de la mortalité. Ils concluent sur le fait que leurs résultats contredisent ceux de modèles (prenant généralement bien en compte l'effet fertilisant du CO_2, mais pas celui de la mortalité) qui prédisent un puits de carbone continu et intense des forêts tropicales. L'étude de Hubau *et coll*. [12] confirme que nous aurions passé le pic de puits de carbone dans les forêts tropicales. Le puits dans la biomasse des forêts intactes d'Amazonie continue de s'affaiblir rapidement, tandis que celui d'Afrique (d'environ 0,66 MgC/ha/an ou tonne C/ha/an) entame seulement son déclin (la mortalité y étant plus faible qu'en Amazonie car les forêts tropicales africaines seraient davantage adaptées à des épisodes de sécheresses et de fortes températures).

Pour conclure, il semble que les forêts anciennes et intactes, que l'on trouve essentiellement dans les forêts tropicales, constituent un puits de carbone. Cependant, il convient de noter que cet effet « puits » est possiblement dû au rôle fertilisant du CO_2 et que, s'il existe à grande échelle, il est probablement faible et en déclin du fait d'une mortalité croissante des arbres en lien avec à la sécheresse et l'augmentation des températures.

3.2. Forêts de repousse (*regrowth forest*)

3.2.1. Cas général

Figure 7. Régénération après un incendie dans le Parc de Yellowstone (USA). Le vieil arbre survivant à gauche est Picea engelmannii, les jeunes arbres sont principalement des Pinus contorta. [Source : Photo © Mav, CC BY-SA 3.0, via Wikimedia Commons]

Le puits résulte ici d'une perturbation de la démographie des forêts qui repoussent à la suite de perturbations naturelles ou anthropiques qui ont fortement affecté leur stock de carbone : coupes dans le cadre d'une forêt gérée, déforestation, dégradation, incendies, etc. (Figure 7) Ces forêts correspondent principalement à :

des régions où la forêt est gérée (Europe occidentale, États-Unis, Canada) y compris des régions très vastes où une forêt généralement assez jeune se développe en lien avec des plantations massives (par exemple en Chine) ;

l'abandon des cultures ou une gestion forestière moins intensive (Russie occidentale) ;

des forêts secondaires « naturelles » qui repoussent après des feux, des dégradations ou la déforestation (dans les tropiques et les régions boréales principalement).

3.2.2. Cas particulier des forêts gérées

Parmi les forêts de repousse, nous présentons ici le cas particulier des forêts gérées. Une forêt bien gérée qui est coupée régulièrement par placettes aura un stock de biomasse relativement stable dans le temps, sauf si la gestion tend à augmenter la densité des peuplements. Mais une telle forêt peut également constituer un puits de carbone si les coupes servent à fabriquer des produits durables tels que des éléments de l'habitat (charpente, revêtement, mobilier). Ce stockage de carbone n'est pas éternel et, à terme, ces produits vont alimenter le stock de carbone atmosphérique. Cependant, ils peuvent présenter un effet retardateur sur des dizaines d'années. Cet effet tampon est augmenté si l'usage et la durée de vie de ces produits issus du bois s'accroît. La durabilité est particulièrement importante pour des essences qui résistent très bien aux attaques des parasites (mélèze, châtaignier, robinier faux-acacia, etc.) et nécessitent très peu de traitements chimiques, voire aucun. Ces essences devraient être donc être privilégiées chaque fois que les conditions s'y prêtent. Une forêt est bien gérée si les récoltes respectent la durabilité des forêts et évitent une surexploitation. Cela sous-entend aussi préserver la biodiversité qui rend la forêt plus résiliente à des événements perturbateurs (attaques parasitaires, tempêtes, incendies, etc.). Ainsi, si les cultures monospécifiques peuvent paraître plus rentables à court terme, elles sont davantage exposées à des risques majeurs (exemple des tempêtes – dont Klaus en 2009, Figure 8 – qui ont ravagé la forêt des Landes).

Figure 8. Forêt des Landes dévastée par l'ouragan Klaus, Bascons (Aquitaine), Février 2009. [Source : Photo © iki-photos via Flickr, (CC BY-NC-SA 2.0)]

La surexploitation forestière (par exemple pour alimenter une centrale à biomasse) via des coupes fréquentes, la récolte des souches et du bois mort, etc. permettent d'augmenter les récoltes à court terme. Cependant, sur le long terme, cela affaiblit la forêt (diminution de la fertilité des sols), peut provoquer un tassement et une érosion des sols, etc. et s'avérer très négatif au final en termes de bilan de carbone.

4. Diminution du stock : la forêt comme source de carbone

De très nombreux facteurs peuvent à l'origine d'une baisse des stocks de carbone de la forêt.

4.1. La déforestation

La déforestation correspond à la transformation d'une surface de forêt en une surface d'un autre type sur le long terme : zone de cultures, de pâturages, de friches arbustives, d'éléments urbains, etc. Cela ne comprend donc pas les coupes forestières conduites dans le cadre d'une gestion de la forêt sur le long terme et qui n'ont que des effets transitoires. Plus généralement, la déforestation est classée dans la catégorie des changements d'usages et d'occupations des sols (*land-use and cover-change*, LUCC). Comme nous l'avons vu, ce terme est l'un des principaux du bilan de carbone de la planète : la déforestation conduit à des émissions de CO_2 dans l'atmosphère d'environ 1,6 ± 0,7 GtC/an. Ce terme, noté E_{LUC}, correspond à la somme algébrique des flux de carbone sortant vers l'atmosphère (coupes d'arbres et respiration des sols après déforestation) et des flux de carbone entrant vers la biosphère (repousse des forêts après des changements d'usage des sols, par exemple sur des zones de cultures abandonnées).

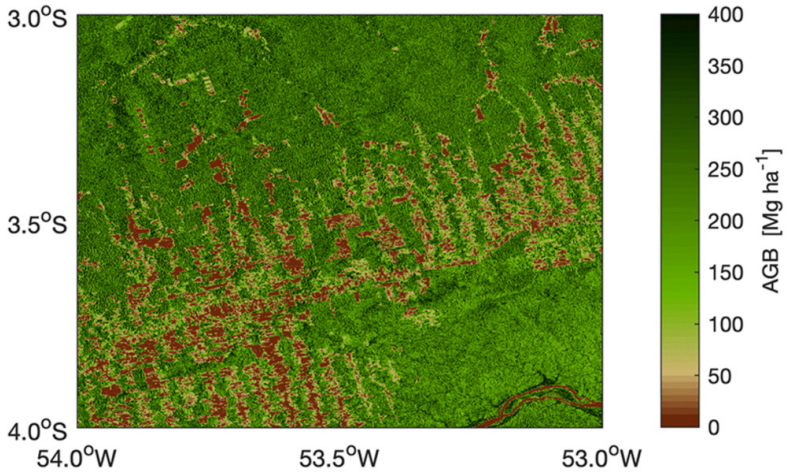

Figure 9. Niveaux de biomasse aérienne d'une zone déforestée. Cartographie d'une zone déforestée de 1° × 1° (soit environ 100 km × 100 km) dans l'état de Parà, au Brésil. Les niveaux de biomasse aérienne (AGB, aboveground biomass) estimés à partir de mesures de télédétection optique, lidar et radar sont de l'ordre de 200 à 250 t/ha (couleur verte). Les zones déforestées correspondent à des sillons marrons. Les zones dégradées qui entourent les zones déforestées apparaissent en vert clair. [Source : Santoro et coll., ref. (14], Licence : CC-BY Source : Earth System Science Data]

De nos jours, la déforestation peut être assez bien surveillée grâce à la télédétection par des méthodes optiques ou radar. Ces dernières permettent d'obtenir des images même à travers les nuages, très fréquents dans les tropiques et les zones boréales (Figure 9) [13]. Le projet Global Forest Watch permet ainsi de suivre la déforestation grâce aux satellites de la série Landsat [14]. Depuis 2015, les satellites optiques (Sentinel 1) et radar (Sentinel 2) de l'Agence spatiale européenne (ESA, *European Space Agency*) offrent une résolution spatiale (10 m) et une répétitivité (deux images par semaine) plus fine qu'auparavant [15]. Suite à la pression internationale (par exemple le programme REDD+ de la FAO de réduction des émissions provenant du déboisement et de la dégradation des forêts), et à la mise en place de la surveillance par télédétection, la déforestation à tendance à diminuer, à l'exception notable du Brésil ces dernières années, en relation avec la politique « environnementale » de ce pays.

4.2. La dégradation des forêts

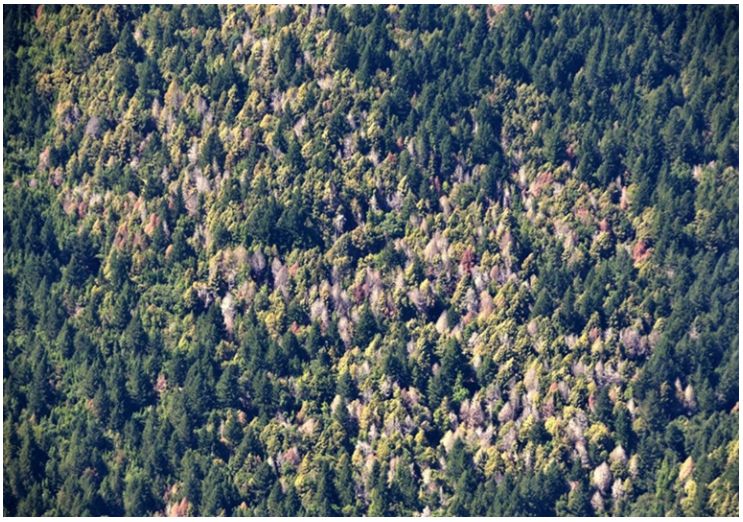

Figure 10. Mortalité soudaine des chênes en Californie (États-Unis) liée à des attaques parasitaires de champignons (Phytophthora ramorum). [Source : Cobb et coll., ref. [17] Licence : CC-BY Source : Earth's Future]

À la déforestation, il convient d'ajouter les phénomènes de dégradation des forêts qui jouent également un rôle important dans les pertes de carbone. Au contraire de la déforestation, lors d'une dégradation, la forêt perd de la biomasse, mais elle reste une surface de forêt. Les dégradations peuvent être d'origine anthropique (coupes sélectives d'arbres ou du sous-bois) ou naturelles. Dans ce dernier cas, des dégradations massives peuvent être liées à des incendies (par exemple en Sibérie), à des attaques de parasites (en particulier aux États-Unis, Figure 10 [16], et dans les forêts boréales du Canada), à des sécheresses épisodiques (phénomènes climatiques El Niño dans les tropiques [17] ; Figure 11) ou plus ou moins chroniques qui entraînent mortalité et dépérissement des arbres sur des surfaces parfois très vastes. Tous ces phénomènes sont exacerbés par le changement climatique qui rend les épisodes extrêmes (sécheresses, tempêtes, inondations, etc.) de plus en plus fréquents et intenses. Il s'ensuit un cercle vicieux : le changement climatique en cours conduit à des dégradations accrues des forêts, ce qui intensifie leur émission de CO_2 dans l'atmosphère et ainsi accentue le changement climatique. Toutefois, contrairement à ce qui se produit lors d'une déforestation, les forêts dégradées peuvent stocker à nouveau le carbone perdu s'il y a une diminution de la pression, que celle-ci soit naturelle (par exemple, baisse des populations de parasites) ou anthropiques (arrêt des coupes). À la différence de la déforestation, les dégradations liées aux activités humaines, qui diminuent l'effet puits de carbone des forêts, sont très difficiles à surveiller par télédétection.

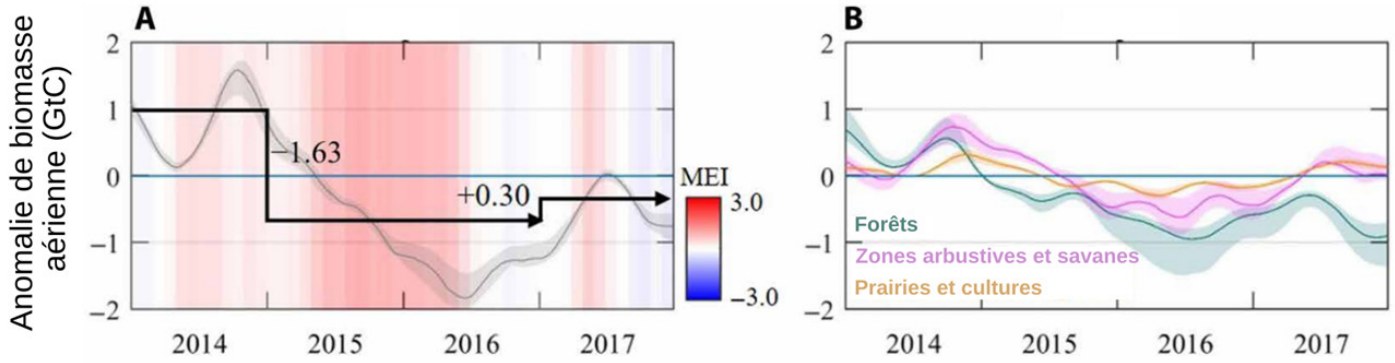

Figure 11. Impact de l'épisode climatique chaud et sec El Niño sur les stocks de carbone aérien de la végétation dans les tropiques (2014-2017). A. Estimation des pertes de stocks de carbone des forêts tropicales (− 1,63 GtC) durant l'épisode El Niño de 2015-2016 et du rétablissement partiel (+ 0,30 GtC) après cet épisode, en 2017. B. Évolution des stocks pour les forêts, les zones arbustives et les savanes, et les zones de végétation basse (prairies, cultures). Ces estimations s'appuient sur le produit L-VOD développé à l'INRAE Bordeaux, ref. [18]. Le MEI est un indice qui mesure l'intensité des oscillations ENSO (El Niño/Southern Oscillation) qui se produisent dans certains États du Pacifique (rouge = forte intensité de l'épisode El Niño). [Source : Wigneron et coll., 2020 Licence : CC-BY-NC Source : Science Advances]

5. Où se situent les grands puits et sources forestiers de carbone ?

5.1. Méthodes d'étude

Tout d'abord, il convient de noter qu'il y a encore de grandes incertitudes dans l'estimation et la quantification des sources et puits forestiers de carbone à l'échelle de la planète.

En effet, si l'estimation du stock de carbone d'une forêt peut être faite relativement précisément à l'échelle locale sur quelques sites, c'est un travail très laborieux et difficile qui consiste à prendre des mesures détaillées des caractéristiques des arbres (hauteur, diamètre moyen du tronc à la hauteur standard de 1,3 m, densité, etc.) sur une placette représentative du peuplement forestier [18]. La spatialisation de ces estimations à une échelle nationale ou continentale reste encore très imprécise. La spatialisation peut s'appuyer :

sur des données de télédétection [19],[20] via des observations optiques ou radar, mais ces mesures saturent pour de fortes valeurs de biomasse de la forêt. Il y a donc un débat dans la communauté sur la validité de ces estimations [21].

sur des données lidar (qui mesurent la hauteur des arbres qui est bien reliée à leur biomasse) telles que celles fournies par le satellite GEDI [22], mais plusieurs années d'observations sont nécessaires pour couvrir l'ensemble de la planète. Ainsi, si des cartes globales de biomasse aérienne forestière sont disponibles [23],[24] elles ne permettent pas un suivi dynamique des changements de stocks.

Les estimations de ces variations s'appuient sur un travail d'inventaire [13] qui se fonde sur des données de suivi des changements des types d'occupations des surfaces (dont celui de la FAO) que l'on pondère par des estimations des stocks de carbone de ces différents types d'occupations. Mais les données d'inventaires présentent une qualité très variable d'un pays à l'autre et, d'autre part, les estimations de biomasse utilisées restent assez grossières.

Très récemment des données d'observation micro-ondes passives (indice végétation L-VOD à grande longueur d'onde, environ 20 cm) ont permis de cartographier les grands puits et sources de carbone continentaux en termes de biomasse aérienne [25]. Les produits basés sur les observations optiques permettent aussi d'estimer l'évolution du taux de couvert des forêts [26] (voir Figure 12 et Focus Carbone & biomasse des forêts).

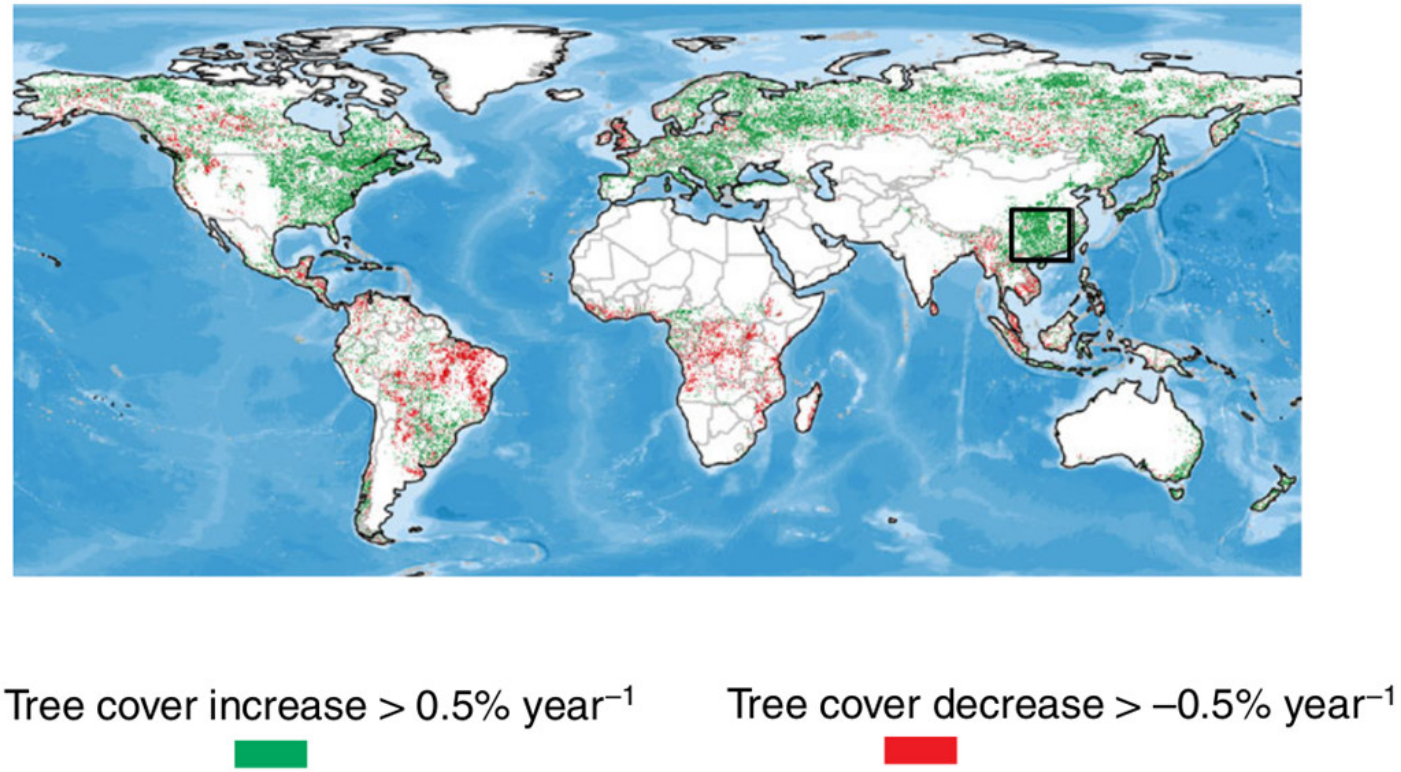

Figure 12. Variations du taux de couvert des forêts dans le monde de 2000 à 2016. Seules les augmentations supérieures et les diminutions inférieures à 0,5 % par an sont représentées. Le rectangle correspond à une zone très dynamique de replantations dans le sud de la Chine. D'après le produit AVHRR Tree cover. [Source : Tong et coll., 2020 Licence : CC-BY Source : Nature Communications]

5.2. Principaux résultats

Nous donnons ici les grandes lignes de résultats très récents et parfois toujours en cours d'analyse. Comme indiqué précédemment, les forêts de repousse constituent d'importants puits de carbone. Ainsi, le programme de reforestation mené en Chine depuis plusieurs années, en particulier dans le sud du pays, est responsable d'un puits de carbone d'environ 0,15 GtC/an. La partie occidentale de la Russie piège également beaucoup de carbone, probablement grâce à l'abandon de certaines zones cultivées et à une diminution de l'exploitation des forêts. Il y a aussi des puits répartis dans l'ensemble des tropiques en lien avec *(i)* les forêts secondaires, c'est-à-dire qui poussent sur des zones anciennement exploitées, *(ii)* une diminution des dégradations liées à certains contextes politiques (par exemple, guerre civile en Centrafrique), *(iii)* des conditions plus humides et propices à la pousse des forêts (sud-est de l'Afrique et centre-est de l'Amérique du Sud).

Notons que ces régions correspondent généralement aux régions dites de verdissement (*greening*) mises en évidence par les satellites optiques (Figure 13) [27]. Cependant, le phénomène de verdissement ne traduit pas forcément un puits de carbone. Par exemple, suite à un incendie ou une coupe forestière, une végétation basse peut se reconstituer très vite et les satellites optiques mesurent alors un verdissement via des indices de végétation (NDVI, indice foliaire), alors que des images micro-ondes L-VOD, qui pénètrent dans la végétation et sondent toute la biomasse, indiquent bien une chute des stocks de carbone.

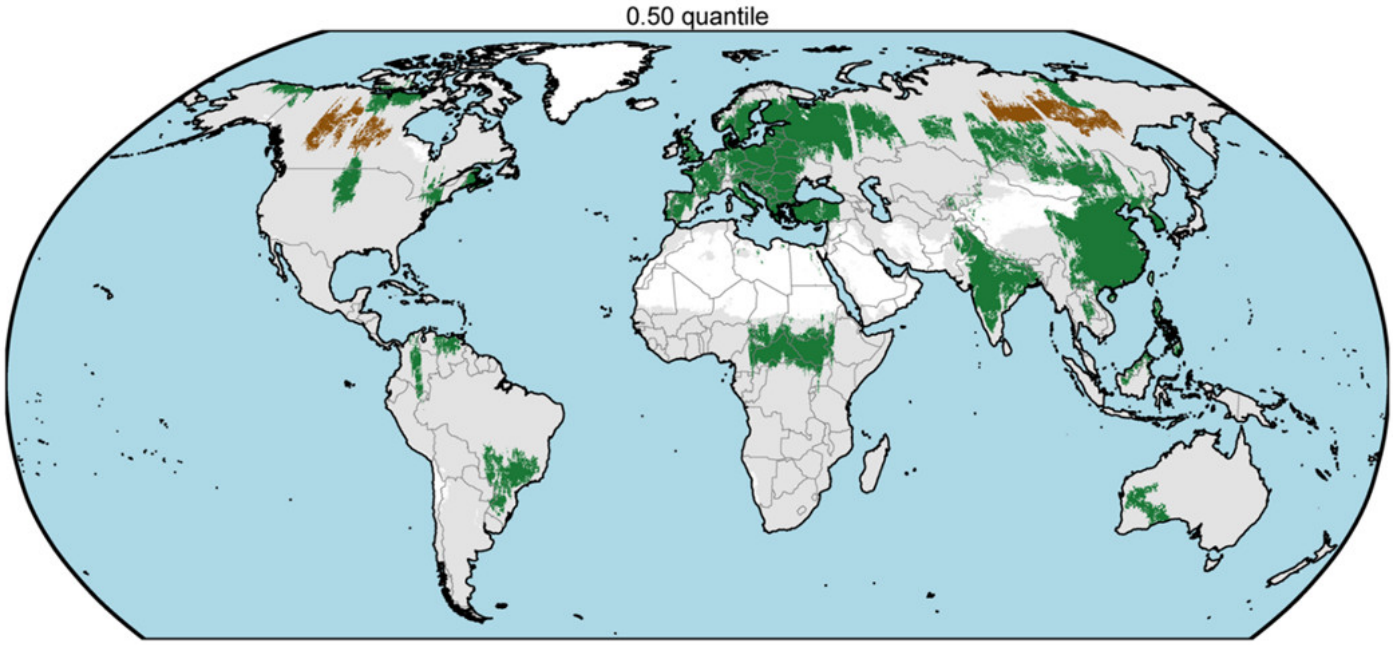

Figure 13. Tendances significatives dans les changements de l'indice foliaire (LAI, leaf area index) sur la période 1981-2018. La couleur verte indique une tendance croissante de l'indice foliaire tandis que le marron signale une tendance décroissante [(voir ref. 6]). Les régions de brunissement dans les forêts boréales sont liées aux feux et aux attaques de parasites. On trouve les régions de verdissement en Europe, Inde, Chine, centre de l'Afrique, centre/est de l'Amérique du Sud. [Source : Cortés et coll., ref. [28] Licence : CC-BY Source : Geophysical Research Letters]

Les études basées sur l'indice L-VOD confirment que les principales sources de carbone se trouvent dans les forêts tropicales humides en lien avec la déforestation et les dégradations (bassin du Congo et de l'Amazonie, incluant le tristement célèbre arc de déforestation dans sa partie Sud-Est) et dans des forêts affectées par des dépérissements et incendies associées à la sécheresse (Sibérie, Australie, extrême sud de l'Afrique). Ainsi, comme suggéré par Edward Mitchard [28], une étude récente a montré que l'ensemble des tropiques étaient devenues neutres sur un plan carbone : les pertes dues à la déforestation/dégradation étant compensées par des régions puits [29].

Plus récemment, une étude a montré que la partie brésilienne de l'Amazonie n'était plus un puits, mais une source de carbone sur la dernière décennie [30]. La nouvelle, très symbolique, a fait le tour du monde, reprise par de nombreux journaux (Figure 14). L'article montre aussi que l'impact des dégradations (« cachées », car généralement non détectées par des satellites optiques) dépasse celui de la déforestation.

Figure 14. La publication parue en 2021 dans Nature Climate Change (ref. [30]) montrant que la partie brésilienne de l'Amazonie n'était plus un puits, mais une source de carbone sur la dernière décennie, a fait l'objet d'une large couverture dans la presse internationale.

6. Atténuation, adaptation et reboisement

Face aux changements climatiques en cours, il est vital d'agir en termes d'atténuation et d'adaptation. L'atténuation consiste à utiliser les capacités des forêts à absorber le CO_2 pour en réduire la teneur atmosphérique. Cela peut par exemple passer par une utilisation plus importante du bois dans les éléments durables de l'habitat (mur, parquet, charpente, isolation, etc.).

L'adaptation des forêts a pour objectif de les rendre moins vulnérables au changement climatique afin d'éviter qu'elles ne deviennent des sources de carbone. Un des éléments clefs est l'adaptation aux températures élevées et à la sécheresse. En effet, les changements climatiques sont si rapides que les forêts n'ont pas le temps de s'adapter, en particulier via des changements de répartition des espèces où celles mieux adaptées à un climat chaud et sec viendraient se substituer à des espèces peu ou pas adaptées aux nouvelles conditions. Ces dernières subissent mortalité et dépérissements en lien avec des attaques d'insectes ou de champignons et des dégâts abiotiques (gel printanier et sécheresse estivale). En France, les espèces les plus touchées sont les hêtres, les châtaigniers, certaines espèces de chênes et de pins ainsi que les épicéas qui vont disparaître des régions où elles ne sont plus adaptées. Inversement, certaines espèces prospèrent, à l'image du chêne vert (Figure 15) en Aquitaine qui remplace progressivement par endroit le chêne pédonculé qui supporte moins bien le stress hydrique [31].

Une des solutions pour accélérer l'adaptation des forêts est de replanter avec des espèces et variétés mieux adaptées aux conditions climatiques actuelles et à venir (voir par exemple le projet RENEssences de l'Office national des forêts).

Figure 15. Feuilles et glands de chêne vert (Quercus ilex). [Source : Photo © Jean-Pierre Wigneron]

On voit aussi fleurir de nombreuses sollicitations autour des replantations dans le cadre de campagnes de publicité ou de sociétés qui veulent verdir leur image. Dans certains cas, ces programmes sont sérieux et utiles s'il s'agit d'éviter des phénomènes d'érosion des sols, de restaurer des écosystèmes disparus, de planter des espèces mieux adaptées à un climat chaud et sec, etc. Mais il convient d'être extrêmement prudent car reboiser peut poser de nombreux problèmes.

Ainsi, replanter massivement peut créer des tensions sur les ressources en eau, car les arbres en consomment beaucoup, ce qui épuise les réserves des sols et peut rendre les reboisements peu durables [32]. Il est donc préférable de replanter dans des régions où la disponibilité en eau est suffisante et où les forêts disparaissent du fait de perturbations anthropiques (déforestation, dégradations, incendies). On peut citer en particulier de vastes régions du bassin d'Amazonie et de la Russie.

Par ailleurs, les replantations ont un bilan carbone très négatif à cause de l'énergie dépensée pour la culture des plants, de l'utilisation d'engins mécaniques, de la construction de routes, etc. Par ailleurs, les arbres plantés peuvent subir des épisodes de mortalité massive (par manque d'irrigation) et les plantations se font souvent avec une seule espèce, ce qui est très peu propice à la biodiversité de la forêt. Cette dernière est pourtant un gage de résilience des forêts aux perturbations biotiques et climatiques. Ainsi, lorsque les conditions sont propices, par exemple dans le cas d'une large éclaircie au sein d'une forêt tropicale, il est largement préférable de laisser la place à une régénération naturelle. Celle-ci est généralement très favorable à la biodiversité et ne nécessite pas d'intervention humaine, synonyme d'émissions de gaz à effet de serre. En résumé, plutôt que de replanter, la priorité devrait donc souvent être donnée à la protection d'immenses régions forestières (en particulier dans les tropiques et en Russie), où les conditions d'humidité des sols sont favorables à la pousse des arbres (et à la régénération naturelle) et où les stocks de carbone diminuent par manque de protection. Si les grandes compagnies internationales veulent réellement investir d'une manière durable et désintéressée, c'est sans doute là que réside le meilleur choix.

7. Messages à retenir

Les forêts représentent un immense stock de carbone via *(i)* la biomasse, *(ii)* le carbone du sol, *(iii)* le bois mort et *(iv)* la litière.

Selon les régions, la forêt peut constituer une source ou un puits de carbone. La déforestation tropicale conduit à une émission importante de CO_2 dans l'atmosphère, alors que la croissance des arbres contribue au contraire à capter le CO_2 atmosphérique.

Les forêts capteraient, selon les estimations, entre 70 et 100 % des 1,8 GtC/an absorbés au niveau des surfaces continentales. Les surfaces non forestières (prairies, cultures, toundra, etc.) capteraient entre 0 et 30 % de ces 1,8 GtC/an.

La densité des stocks est similaire dans les forêts tropicales et boréales ; mais dans les forêts tropicales, les stocks se localisent principalement dans la biomasse (56 %) contre 32 % pour le sol ; vs 20 % et 60 % pour les forêts boréales.

Sur un total de 360 GtC de biomasse vivante (aérienne et souterraine), les tropiques représentent environ 70 % (260 GtC) des

stocks de carbone des forêts de la planète, dont à peu près 40 % (140 GtC) pour la seule partie tropicale américaine et 25 % (93 GtC) en considérant uniquement la biomasse aérienne vivante de l'Amazonie.

Les forêts anciennes et intactes (essentiellement dans les forêts tropicales), constituent un puits de carbone, mais cet effet « puits » est probablement faible et en déclin du fait d'une mortalité croissante des arbres en lien avec à la sécheresse et l'augmentation des températures.

De très nombreux facteurs peuvent être à l'origine d'une baisse des stocks de carbone de la forêt, comme la déforestation ou la dégradation des forêts. Ainsi, sur la dernière décennie, la partie brésilienne de l'Amazonie n'est plus un puits, mais une source de carbone.

Les forêts de repousse constituent d'importants puits de carbone, mais les opérations de replantations sont une source de carbone très importante à cause de l'énergie dépensée pour la culture des plants, de l'utilisation d'engins mécaniques, de la construction de routes, etc.

Lorsque les conditions sont propices, il est largement préférable de laisser la place à une régénération naturelle : celle-ci est généralement très favorable à la biodiversité et ne nécessite pas d'opérations de replantation.

Plutôt que de replanter, la priorité devrait souvent être donnée à la protection d'immenses régions forestières (en particulier dans les tropiques et en Russie), où les conditions d'humidité des sols sont favorables à la pousse des arbres (et à la régénération naturelle) et où les stocks de carbone diminuent par manque de protection.

Cet article a initialement été publié en décembre 2021 par Planet Vie sous licence Creative Commons : Rôle des forêts dans le bilan de carbone de la planète. Il a été édité par M. Pascal Combemorel, Responsable éditorial du site Planet-Vie.

Notes et références

Image de couverture. Image par JoeBreuer de Pixabay.

[1] Qin Y., Xiao X., Wigneron J.-P. *et al.*, Annual Maps of Forests in Australia from Analyses of Microwave and Optical Images with FAO Forest Definition, *Journal of Remote Sensing*, AAAS, 2021, Article ID 9784657, https://doi.org/10.34133/2021/9784657

[2] Friedlingstein, P., *et al.*, Global Carbon Budget 2020, *Earth Syst. Sci. Data*, 12, 3269–3340, https://doi.org/10.5194/essd-12-3269-2020, 2020.

[3] Le Quéré, C. *et al.* Global Carbon Budget 2016. *Earth Syst. Sci. Data* 8, 605–649 (2016), https://doi.org/10.5194/essd-8-605-2016

[4] Houghton, R. A. & Nassikas, A. A. Global and regional fluxes of carbon from land use and land cover change 1850–2015. *Glob. Biogeochem. Cycles* 31, 456–472 (2017), https://doi.org/10.1002/2016GB005546

[5] Pan, Y. D. *et al.* A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science* 333, 988–993 (2011), https://doi.org/10.1126/science.1201609

[6] Malhi Y. *et al.* (2006), The regional variation of aboveground live biomass in old-growth Amazonian forests. *Global Change Biology*, 12: 1107-1138. https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2006.01120.x

[7] Pugh T. *et al.*, Role of forest regrowth in global carbon sink dynamics, *Proc. Nat. Acad. Sci USA* 116 (10) 4382-4387 (2019) https://doi.org/10.1073/pnas.1810512116

[8] Yang, H *et al.*, Coarse woody debris is buffering mortality-induced carbon losses to the atmosphere in tropical forests, *Environ. Res. Lett.* 16 (2021) 011006, https://doi.org/10.1088/1748-9326/abd58a

[9] Luyssaert, S., Schulze, ED., Börner, A. *et al.* Old-growth forests as global carbon sinks. *Nature* 455, 213–215 (2008). https://doi.org/10.1038/nature07276

[10] Gundersen, P., Thybring, E.E., Nord-Larsen, T. *et al.* Old-growth forest carbon sinks overestimated. *Nature* 591, E21–E23 (2021). https://doi.org/10.1038/s41586-021-03266-

[11] Brienen, R. J. W. *et al.* Long-term decline of the Amazon carbon sink. *Nature* 519, 344–348 (2015). https://doi.org/10.1038/nature14283

[12] Hubau, W., Lewis, S.L., Phillips, O.L. *et al.* Asynchronous carbon sink saturation in African and Amazonian tropical forests. *Nature* 579, 80–87 (2020). https://doi.org/10.1038/s41586-020-2035-0

[13] Santoro, M. *et al.*, The global forest above-ground biomass pool for 2010 estimated from high-resolution satellite observations, *Earth Syst. Sci. Data*, 13, 3927–3950, https://doi.org/10.5194/essd-13-3927-2021, 2021.

[14] Hansen, M. C., Potapov, P. & Tyukavina, A. Comment on 'Tropical forests are a net carbon source based on aboveground measurements of gain and loss'. *Science* 363, eaar3629 (2019), https://doi.org/10.1126/science.aar3629

[15] Ygorra, B., Frappart F., Wigneron J.-P. *et al.*, Monitoring loss of tropical forest cover from Sentinel-1 time-series: A CuSum-based approach, *International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation* 103 (2021) 102532, https://doi.org/10.1016/j.jag.2021.102532, 2021.

[16] Cobb, R. C., Haas, S. E., Kruskamp, N., Dillon, W. W., Swiecki, T. J., Rizzo, D. M., *et al.* (2020). The magnitude of regional-scale tree mortality caused by the invasive pathogen *Phytophthora ramorum*. *Earth's Future*, 8, e2020EF001500. https://doi.org/10.1029/2020EF001500

[17] Wigneron, J.-P., L. Fan, P. Ciais *et al.*, Tropical forests did not recover from the strong 2015-2016 El Niño event, *Science Advances*, vol. 6, no. 6, eaay4603, 2020, https://doi.org/10.1126/sciadv.aay4603

[18] Chave, J. *et al.* Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. *Glob. Chang. Biol.* 20, 3177–3190 (2014).

[19] Baccini, A. *et al.*, Tropical forests are a net carbon source based on aboveground measurements of gain and loss. *Science* 358, 230–234 (2017), https://doi.org/10.1126/science.aam5962

[20] Houghton, R. A. & Nassikas, A. A. Global and regional fluxes of carbon from land use and land cover change 1850–2015. *Glob. Biogeochem. Cycles* 31, 456–472 (2017), https://doi.org/10.1002/2016GB005546

[21] Hansen, M. C. *et al.* High-resolution global maps of 21st-century forest cover change. *Science* 342, 850–853 (2013). https://doi.org/10.1126/science.1244693

[22] Dubayah, R. *et al.* The Global Ecosystem Dynamics Investigation: high-resolution laser ranging of the Earth's forests and topography. *Sci. Remote Sens.* 1, 100002 (2020), https://doi.org/10.1016/j.srs.2020.100002

[23] Baccini, A. *et al.* Estimated carbon dioxide emissions from tropical deforestation improved by carbon-density maps. *Nat. Clim. Chang.* 2, 182–185 (2012). https://doi.org/10.1038/nclimate1354

[24] Saatchi, S. S. *et al.* Benchmark map of forest carbon stocks in tropical regions across three continents. *Proc. Natl Acad. Sci. USA* 108, 9899–9904 (2011). https://doi.org/10.1073/pnas.1019576108

[25] Wigneron, J.-P., Li, X., *et al.*, SMOS-IC data record of soil moisture and L-VOD: historical development, applications and perspectives, *Remote Sens. Env.*, 254, 112238, https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112238, 2021.

[26] Tong, X., M. Brandt *et al.*, Forest management in southern China generates short term extensive carbon sequestration, *Nature Comm.*, 11:129, 2020, https://doi.org/10.1038/s41467-019-13798-8

[27] Cortés, J. *et al.*, Where are global vegetation greening and browning trends significant? *Geophysical Research Letters*, 48, e2020GL091496. https://doi.org/10.1029/2020GL091496

[28] Mitchard, E.T.A. The tropical forest carbon cycle and climate change. *Nature* 559, 527–534 (2018). https://doi.org/10.1038/s41586-018-0300-2

[29] Fan, L., J.-P. Wigneron, P. Ciais *et al.*, Satellite observed pantropical carbon dynamics, *Nature Plants*, 5, 944–951, July 2019, https://doi.org/10.1038/s41477-019-0478-9.

[30] Qin, Y. *et al.* (2021). Carbon loss from forest degradation exceeds that from deforestation in the Brazilian Amazon, *Nature*

Climate Change, 11, 442–448, https://doi.org/10.1038/s41558-021-01026-5

[31] Urli, M., Lamy, JB., Sin, F. *et al.* The high vulnerability of *Quercus robur* to drought at its southern margin paves the way for *Quercus ilex*. *Plant Ecol* 216, 177–187 (2015). https://doi.org/10.1007/s11258-014-0426-8

[32] Tong, X., M. Brandt *et al.*, Forest management in southern China generates short term extensive carbon sequestration, *Nature Comm*., 11:129, 2020, https://doi.org/10.1038/s41467-019-13798-8

L'Encyclopédie de l'environnement est publiée par l'Université Grenoble Alpes - www.univ-grenoble-alpes.fr

Pour citer cet article: **Auteurs :** WIGNERON Jean-Pierre - CIAIS Philippe (2023), Rôle des forêts dans le bilan de carbone de la planète, Encyclopédie de l'Environnement, [en ligne ISSN 2555-0950] url : http://www.encyclopedie-environnement.org/?p=19252

Les articles de l'Encyclopédie de l'environnement sont mis à disposition selon les termes de la licence Creative Commons Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale - Pas de Modification 4.0 International.