

Carbone et forêt : de quoi parle-t-on ?

par Simon MARTEL

Pour débiter la série de journées d'information organisées par Forêt Méditerranéenne sur le thème « Carbone et forêt méditerranéenne » il nous a semblé essentiel de faire le point sur les différentes notions et les enjeux relatifs au sujet complexe de l'atténuation du changement climatique par la forêt. Les forêts françaises sont un réservoir de carbone dont les stocks se répartissent entre les compartiments du sol, de la litière, de la biomasse et du bois mort. Différentes techniques de mesures, complémentaires entre elles, permettent d'évaluer les stocks et les flux de ces compartiments. Cet article permet d'y voir plus clair et de faire un point sur ces notions.

La réalité du changement climatique ne fait aujourd'hui plus débat et est reconnue par l'immense majorité des professionnels forestiers (AMM *et al.*, 2019). L'augmentation des émissions anthropiques de gaz à effet de serre (GES) est la principale cause de ce réchauffement. Le CO₂, bien que naturellement présent dans l'atmosphère, est le gaz le plus impliqué dans le réchauffement. Il est en effet responsable de 73% de l'effet de serre (GIEC, 2014), sa concentration étant passée de 280 ppm (partie par million) avant l'ère industrielle à plus de 400 ppm aujourd'hui. Les projections les plus pessimistes montrent même que l'on pourrait monter à plus de 900 ppm d'ici 2100 (scénario RCP 8.5 du GIEC). Grâce à la capacité des végétaux à capter le CO₂ atmosphérique, les forêts se trouvent au cœur du cycle du carbone et donc au centre des enjeux d'atténuation du changement climatique.

Les forêts, d'immenses réservoirs de carbone

A l'échelle planétaire, le carbone se répartit entre quatre grands réservoirs : l'atmosphère sous forme de gaz, la biosphère sous forme de matière organique, l'océan sous forme de calcaire et CO₂ dissous et le sous-sol sous forme de roches, sédiments et combustibles fossiles. Chacun de ces réservoirs contient un stock de carbone, qui évolue en fonction des échanges entre les différents réservoirs. Les données actuelles montrent que les stocks de l'atmosphère et des océans augmentent alors que ceux des réserves fossiles et dans une moindre mesure de la biosphère diminuent. Au sein de la biosphère, 861 GtC sont stockées dans les forêts mondiales, réparties dans différents compartiments : les sols (44%), la biomasse aérienne et souterraine (42%), le bois mort (8%) et la litière (8%) (PAN *et al.*, 2011).

Jongler avec les unités du carbone

Deux unités coexistent dès lors qu'on parle du carbone forestier : les tC (tonnes de carbone) et les tCO₂ (tonnes de CO₂). Les tonnes de carbone sont utilisées pour parler des stocks (hors atmosphère) et les tonnes de CO₂ pour les flux. On passe de l'une à l'autre par un rapport de masse molaire :

$$1 \text{ tC} = 44/12 \text{ tCO}_2 \text{ soit environ } 3,67 \text{ tCO}_2.$$

En France métropolitaine, les stocks forestiers sont de l'ordre de 2500 MtC (CGDD, 2019) : c'est l'équivalent de 20 années d'émissions nationales (sur la base des émissions de 2016). Il s'agit du réservoir qui représente de loin les stocks les plus importants en France. Au sein de l'écosystème forestier, c'est le compartiment du sol qui contient le plus de carbone : en moyenne 81 tC/ha dans les 30 premiers cm (données RMQS, GIS Sol). Les modèles estiment qu'en prenant en compte une plus grande profondeur, le stock moyen atteindrait 102 tC/ha (PELLERIN *et al.*, 2019). Ces quantités sont très variables entre les différentes forêts et dépendent principalement du pédoclimat. Il est à noter que les forêts d'altitude contiennent des stocks de carbone du sol plus importants en raison des basses températures peu propices au développement des micro-organismes responsables de la décomposition des matières organiques. Concernant les forêts méditerranéennes, une étude menée en Bulgarie, Italie, Portugal et Espagne estime une moyenne de stock de carbone d'environ 60 tC/ha pour les 30 premiers centimètres du sol (RODEGHIERO *et al.*, 2011).

Les stocks de la biomasse des forêts en France sont en moyenne de 78 tC/ha (IGN, 2019), dont 20% environ serait contenu dans la biomasse racinaire. Là encore, ce stock est évidemment très variable suivant les parcelles et directement dépendant du volume de bois et de l'infradensité des essences d'arbres en place. Les stocks de carbone biomasse sont plus faibles en milieu méditerranéen en raison des conditions (chaleur, sécheresse, incendie) qui restreignent la croissance forestière, même si localement on peut trouver des stocks élevés (Cf. Tab. I).

néen en raison des conditions (chaleur, sécheresse, incendie) qui restreignent la croissance forestière, même si localement on peut trouver des stocks élevés (Cf. Tab. I).

Des stocks de carbone vivants

Les stocks forestiers ne sont pas figés : des flux existent entre les différents compartiments forestiers et avec l'atmosphère : par exemple, les arbres captent du carbone grâce à la photosynthèse mais en réémettent par la respiration autotrophe (Cf. Fig. 1). Les coupes sont également des flux sortants pour le réservoir « forêt » car ils exportent le carbone vers un autre réservoir.

Lorsque le stock de carbone d'un réservoir augmente dans le temps, c'est à dire que le flux net entrant est positif, on parle de puits de carbone. Lorsqu'à l'inverse ce compartiment perd du carbone, il est défini comme une source de carbone. Le pas de temps considéré est ici important : un peuplement peut être ponctuellement source de carbone en période de sécheresse, tout en étant un puits sur l'année. Dans la plupart des cas, on caractérise les forêts comme puits ou source sur des périodes annuelles ou pluriannuelles.

Mesurer le carbone en forêt

Évaluer le carbone de la biomasse forestière se fait généralement par inventaire, de la même manière que les forestiers ont l'habitude de mesurer des volumes de bois. Des facteurs de conversion permettent de passer des mesures dendrométriques (diamètres et hauteurs) aux stocks de carbone. Suivant l'échelle et la précision attendue, ces inventaires peuvent aussi bien être ceux des gestionnaires au sein d'un peuplement ou d'une

Tab. I :

Les stocks et flux de carbone liés à la biomasse forestière par domaine biogéographique (Source : IGN, 2018 ; stock : mesures 2011-2015 ; flux : mesures 2006-2015).

Domaine biogéographique	Surface (millier d'ha)	Stocks de carbone totaux (MtC)	Stocks de carbone par hectare (tC/ha)	Flux de CO ₂ total (MtCO ₂ /an)*	Flux de CO ₂ par hectare (tCO ₂ /ha/an)*
Domaine atlantique	8728	687,9	78,8	-35,4	-4,06
Domaine continental	3230	311,1	96,3	-14,6	-4,54
Domaine des hautes montagnes	1956	147,2	75,3	-7,4	-3,81
Domaine méditerranéen	1760	80	45,5	-5	-2,84
France	15674	1226,3	78,2	-62,5	-3,99

* Une valeur négative signifie une séquestration de CO₂ par la forêt.

propriété que l'inventaire national conduit par l'Institut national de l'information géographique et forestière (IGN). Ce sont d'ailleurs les chiffres fournis par ce dernier qui sont utilisés par la France pour le rapportage international auprès de la Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques (CITEPA, 2020).

Le développement des technologies de télédétection ouvre la voie à l'évaluation des stocks de carbone à partir des satellites ; ces mesures sont aujourd'hui valables à l'échelle continentale, mais les perspectives à des échelles plus locales à partir des images existantes sont prometteuses et les missions spatiales à venir devraient encore améliorer la précision (DEJOUX et MORIN, 2019).

Les mesures de carbone du sol s'effectuent par prélèvement d'échantillons qui sont ensuite envoyés en laboratoire pour analyse. L'hétérogénéité des stocks au sein d'une même parcelle oblige à effectuer de nombreux relevés : cette mesure s'avère donc coûteuse. De ce fait, le suivi du carbone du sol n'est pas accessible aux gestionnaires forestiers et est réservé à la recherche ou aux inventaires nationaux.

Que ce soit pour la biomasse ou pour le sol, les flux interannuels sont estimés par la comparaison d'inventaires réalisés sur différentes années. Enfin, les scientifiques ont développé des systèmes de mesure en temps réel des flux de carbone dans l'écosystème grâce à des capteurs placés sur des « tours à flux » et par la méthode des « flux turbulents ». Ce type de mesure à haute fréquence apporte des informations en temps réel sur les échanges de carbone, mais ne sont valables que pour les rares forêts où ces infrastructures sont installées (une dizaine en France). Cf. Fig. 2.

La forêt française : un puits de carbone

La forêt française est un puits net de carbone de 88 Mt CO₂/an dont 70 Mt CO₂/an est séquestré dans la biomasse et 18 Mt CO₂/an dans les sols et le bois mort (ROUX *et al.*, 2017). Ainsi, pas loin de 20 % des émissions françaises sont absorbées chaque année par les forêts. Cet effet de puits est principalement lié à l'extension en surface de la forêt et au fait que les prélèvements sont infé-

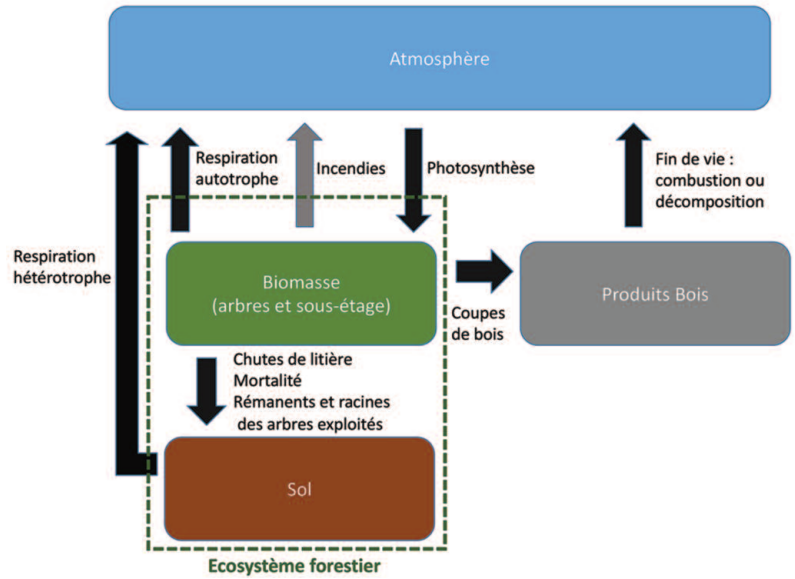


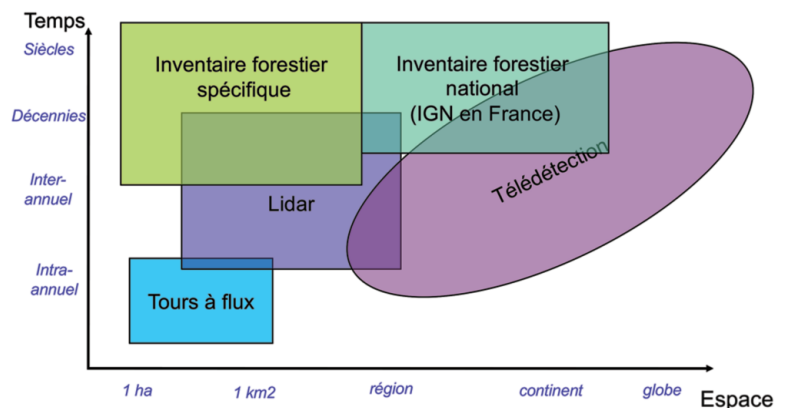
Fig. 1 : Principaux réservoirs et flux de carbone liés à l'écosystème forestier.

rieurs à l'accroissement biologique net. De nombreuses interrogations subsistent sur l'avenir à long terme de ce puits. En raison d'une dynamique de croissance moindre, l'effet puits par unité de surface dans le domaine méditerranéen est au-dessous de la moyenne française, mais est loin d'être négligeable : 2,84 t CO₂/ha/an, sans le puits du sol (Cf. Tab. I). Les incendies sont également un facteur de relargage ponctuel du carbone de la biomasse et de la litière (RUIZ-PEINADO *et al.*, 2017).

Rôle des produits bois

L'exploitation des forêts ne constitue pas un relargage total de carbone, car celui-ci

Fig. 2 : Les techniques de mesure du carbone forestier aux différentes échelles spatio-temporelles.



continue en partie à être stocké dans les produits bois : il y a transfert partiel d'un compartiment à un autre. On considère à l'échelle de la France que l'effet « puits produits bois » est aujourd'hui nul : cela signifie que la quantité de carbone stocké dans les produits bois de l'année est égale au déstockage annuel lié à la fin de vie des produits bois antérieurs. Il n'en demeure pas moins un levier qui peut être activé en augmentant l'utilisation du bois ou en prolongeant la durée de vie des produits (Cf. Fig. 3).

Enfin, l'utilisation de bois en remplacement des matériaux plus énergivores (aluminium, acier, PVC, béton, ou autres) et/ou de la biomasse forestière à la place des énergies fossiles (charbon, fioul, gaz, etc.) engendre l'évitement d'émissions de GES. On parle respectivement de substitution matériau et substitution énergie. La quantification de la substitution est complexe, car elle repose sur des hypothèses sur l'usage du bois et sur les solutions de référence remplacées. On retiendra que la substitution matériau est plus avantageuse que la substitution énergie ramenée au mètre cube de bois produit.

Les différents leviers forestiers d'atténuation du changement climatique peuvent se résumer aux « 5S » : Séquestration dans la biomasse forestière, dans les Sols forestiers, Stockage dans les produits bois, Substitution matériau et Substitution énergie.

Il n'y a pas que le carbone dans l'histoire

Le potentiel de réchauffement global (PRG) mesure la contribution de chaque gaz à l'effet de serre en combinant son forçage radiatif et son temps de résidence dans l'atmosphère. Ainsi, le méthane a un PRG 28 fois plus fort que le CO₂ et constitue donc un puissant gaz à effet de serre. En forêt, les sols peuvent émettre du méthane par l'activité de bactéries méthanogènes en milieu anaérobie mais cela concerne principalement les « forêts inondées », absentes en France métropolitaine. A l'inverse, les sols captent également du méthane grâce aux bactéries méthanotrophes responsables d'une oxydation biologique. A l'échelle mondiale, ce sont les sols forestiers tempérés qui sont le puits de méthane le plus efficace, avec néanmoins une variabilité très forte : un facteur 600 entre les deux extrêmes mesurés (DUTAUR et VERCHOT, 2007). En France, EPRON *et al.* (2016) ont mesuré pendant deux ans dans une jeune plantation de chênes sessiles de Meurthe et Moselle des flux moyens de -3,0 kg CH₄ /ha/an, soit l'équivalent de 0,08 t CO₂/ha/an. Le sous-étage forestier amplifierait ce rôle de puits (PLAIN *et al.*, 2018). Cela reste toutefois mineur par rapport au puits de carbone des sols forestiers : 1,28 t CO₂/ha/an mesuré sur les placettes RENECOFOR (JONARD *et al.*, 2017).

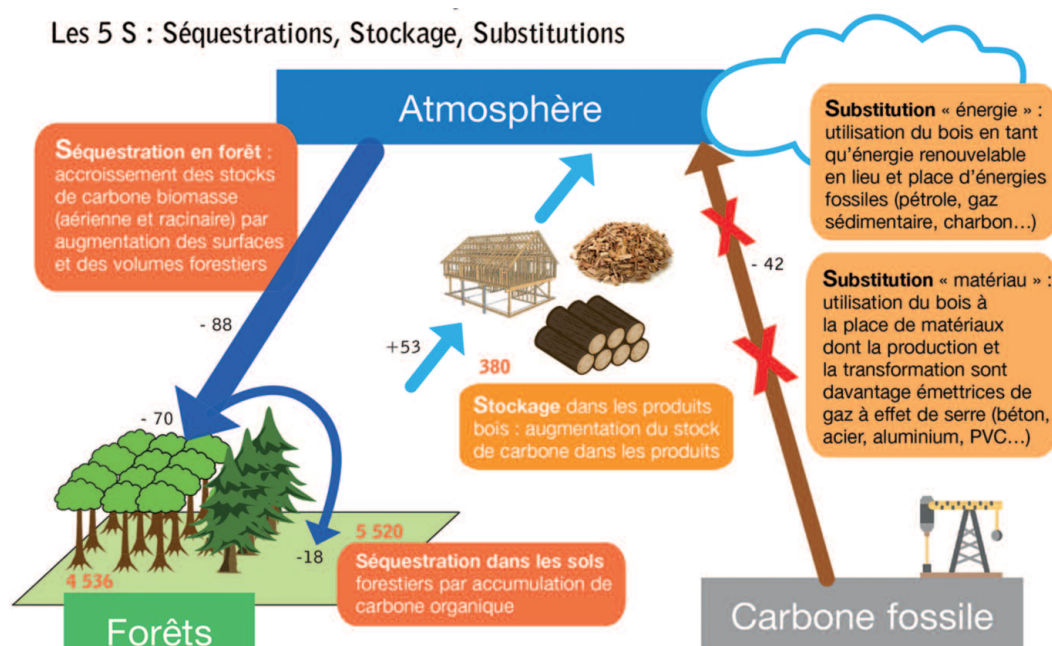


Fig. 3 :
Rôle de la forêt française dans le cycle du carbone.
Source :
Forêt Entreprise 245.

Les valeurs de carbone sont en MtCO₂e (Million de tonnes de dioxyde de carbone équivalent) : Valeurs de stocks en orange, valeurs de flux en noir, X émissions évitées.
Source : CNPF-IDF, d'après les données de l'Inra-IGN, 2017.

Par ailleurs, les types d'occupation du sol influencent les flux d'énergie à l'interface surface/atmosphère et ont donc un impact sur les températures locales : on parle d'effets biophysiques. Les principaux effets biophysiques sont l'albédo et l'évapotranspiration. Ils peuvent être réchauffant ou refroidissant suivant l'occupation du sol (terrain nu *vs* forêt), les essences (résineux *vs* feuillus) ou le mode de gestion. La prise en compte intégrée des effets « carbone » et « biophysiques » fait l'objet de travaux de recherche faisant appel à la modélisation (VALADE et MARIE, 2020), dont les conclusions pratiques doivent encore être affinées.

A la recherche d'équilibre entre séquestration et substitution

Comme l'ont montré plusieurs études nationales, activer le levier de la substitution par une augmentation des prélèvements implique une diminution à court terme de l'effet de séquestration via le puits forestier (ROUX *et al.*, 2017 ; VALADE *et al.*, 2018). Sur le long terme, cette perte de séquestration pourrait être compensée par le cumul des effets de substitution : on parle alors de dette carbone. Ce temps de retour de la dette carbone s'élèverait à plusieurs décennies mais il est très difficile à estimer, notamment compte-tenu des incertitudes méthodologiques relatives à la substitution.

En 2019, la France s'est fixé comme ambitieux objectif d'atteindre la neutralité carbone d'ici 2050. Pour atteindre cet objectif et décarboner la France, le bois semble être un matériau et une source d'énergie essentiel. Pour favoriser l'utilisation du bois, la stratégie choisie dans le cadre de la Stratégie nationale bas carbone (SNBC) est d'augmenter les prélèvements. Toutefois, le pays compte également sur le puits forestier pour annuler les émissions non réductibles (principalement liées à l'agriculture). L'équilibre à trouver entre l'augmentation des prélèvements de bois pour substituer et le maintien du puits sera sensible et présente un fort enjeu pour les années à venir. En tout état de cause, limiter l'impact du changement climatique sur nos forêts aura un effet positif sur l'ensemble de ces leviers car seul un écosystème en bonne santé et résilient permet-

tra de rendre les services d'atténuation du changement climatique évoqués ci-dessus.

L'enjeu du carbone entre ainsi au cœur du métier du forestier, parmi toutes les autres facettes de la gestion multifonctionnelle ; avec un écueil à éviter : celui de croire que la forêt est une solution miracle qui nous affranchit de réduire nos émissions.

S.M.

Simon MARTEL
Ingénieur forestier
au CNPF-IDF
6 Parvis des Chartrons
33075 BORDEAUX
Cedex
simon.martel@cnpf.fr

Bibliographie

- Amm, A., Pilard-Landeau, Sevrin, E., Perrier, C., Thomas, J., Legay, M., Hippolyte, N., 2019. État de la mobilisation des forestiers face au changement climatique. *Forêt-Entreprise* 20–23.
- CITEPA, 2020. Rapport National d'Inventaire pour la France au titre de la Convention cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques et du Protocole de Kyoto. 786 p.
- Commissariat général au développement durable, 2019. EFESE – *La séquestration du carbone par les écosystèmes français*. La Documentation Française (ed.). Collection Théma Analyse, e-publication.
- Dejoux, J.-F., Morin, D., 2019. Suivis annuels d'occupation du sol et de ressources forestières en France. *Forêt-Entreprise* 25–30.
- Dutaur, L., Verchot, L.V., 2007. A global inventory of the soil CH₄ sink. *Global Biogeochemical Cycles* 21. <https://doi.org/10.1029/2006GB002734>
- Epron, D., Plain, C., Lerch, T., Ranger, J., 2016. Les sols forestiers, puits de méthane : un service écosystémique méconnu. *Revue Forestière Française* 313. <https://doi.org/10.4267/2042/62129>
- Jonard, M., Nicolas, M., Coomes, D.A., Caignet, I., Saenger, A., Ponette, Q., 2017. Forest soils in France are sequestering substantial amounts of carbon. *Science of The Total Environment* 574, 616–628. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.09.028>
- Pan, Y., Birdsey, R.A., Fang, J., Houghton, R., Kauppi, P.E., Kurz, W.A., Phillips, O.L., Shvidenko, A., Lewis, S.L., Canadell, J.G., Ciais, P., Jackson, R.B., Pacala, S.W., McGuire, A.D., Piao, S., Rautiainen, A., Sitch, S., Hayes, D., 2011. A Large and Persistent Carbon Sink in the World's Forests. *Science* 333, 988–993. <https://doi.org/10.1126/science.1201609>
- Pellerin, S. (ed), Bamiere, L. (ed), Launay, C., Martin, R., Schiavo, M., Angers, D., Augusto, L., Balesdent, J., Basile-Doelsch, I., Bellassen, V., Cardinael, R., Cécillon, L., Ceschia, E., Chenu, C., Constantin, J., Darroussin, J., Delacote, P., Delame, N., Gastal, F., Gilbert, D., Graux, A.-L.,

Guenet, B., Houot, S., Klumpp, K., Letort, E., Litrico, I., Martin, M., Menasseri, S., Meziere, D., Morvan, T., Mosnier, C., Estrade, J.R., Saint-André, L., Sierra, J., Théron, O., Viaud, V., Grateau, R., Le Perche, S., Savini, I., Réchauchère, O., 2019. *Stocker du carbone dans les sols français, Quel potentiel au regard de l'objectif de 4 pour 1000 et à quel coût ?* Synthèse du rapport d'étude. INRA.

Plain, C., Ndiaye, F.-K., Bonnaud, P., Ranger, J., Epron, D., 2019. Impact of vegetation on the methane budget of a temperate forest. *New Phytologist* 221, 1447–1456. <https://doi.org/10.1111/nph.15452>

Roux A., Dhôte J.-F. (Coordinateurs), Achat D., Bastick C., Colin A., Bailly A., Bastien J.-C., Berthelot A., Bréda N., Caurla S., Carnus J.-M., Gardiner B., Jactel H., Leban J.-M., Lobianco A., Loustau D., Meredieu C., Marçais B., Martel S., Moisy C., Pâques L., Picart-Deshors D., Rigolot E., Saint-André L., Schmitt B. (2017). *Quel rôle pour les forêts et la filière forêt-bois françaises dans l'atténuation du changement climatique?*

Une étude des freins et leviers forestiers à l'horizon 2050. Rapport d'étude pour le ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation, INRA et IGN, 101 p. + 230 p. (annexes)

Rodeghiero, M., Rubio, A., Díaz-Pinés, E., Romanyà, J., Marañón-Jiménez, S., Levy, G.J., Fernandez-Getino, A.P., Sebastià, M.T., Karyotis, T., Chiti, T., 2011. Soil carbon in Mediterranean ecosystems and related management problems. Soil carbon in sensitive European ecosystems: from science to land management 175–218.

Valade, A., Luysaert, S., Vallet, P., Njakou Djomo, S., Jesus Van Der Kellen, I., Bellassen, V., 2018. Carbon costs and benefits of France's biomass energy production targets. *Carbon Balance and Management* 13, 26. <https://doi.org/10.1186/s13021-018-0113-5>

Valade, A., Marie, G., 2020. Gérer les forêts pour atteindre les objectifs climatiques : des compromis à trouver. *Sciences Eaux et Territoires* 78–81. <https://doi.org/10.14758/SET-REVUE.2020.3.14>

Résumé

Cet article fait le point sur les différentes notions et les enjeux relatifs au sujet complexe de l'atténuation du changement climatique par la forêt. Les forêts françaises sont un réservoir de carbone dont les stocks se répartissent entre les compartiments du sol, de la litière, de la biomasse et du bois mort. Différentes techniques de mesures, complémentaires entre elles, permettent d'évaluer les stocks et les flux de ces compartiments.

En France, les forêts constituent également un puits de carbone, en séquestrant annuellement 88 MtCO₂. Mais leur rôle ne s'arrête pas là car les produits bois issus de la gestion forestière prolongent la séquestration du carbone et permettent d'éviter des émissions de carbone par effets de substitution matériau et énergie. Alors que des efforts de recherche concernent l'impact des effets biophysiques sur l'atténuation, le débat actuel porte sur l'équilibre à trouver entre les leviers de séquestration et de substitution.

Summary

Carbon and forests: what's it all about?

This article gives an update on the different concepts and issues related to the complex subject of the mitigation of climate change by forests. French forests form a carbon reservoir whose stocks are divided variously across the soil, litter, biomass and dead wood. Different but complementary techniques for measuring these stocks makes possible their evaluation as well as the fluxes involved at the various levels.

In France, the forests also constitute a carbon sink, sequestering some 88 million tonnes of CO₂ annually. But the role of forests is not limited to such aspects because the wood products arising from forestry management prolongs the capture of the carbon, thus avoiding carbon emissions via the substitution of materials and energy sources. While research efforts focus on the impact of biophysical effects on mitigating climate change, debate currently centres on the balance between the dynamic for fixing carbon and that for substitution.