

EMPREINTE CARBONE DE LA FORÊT ET DE L'UTILISATION DE SON BOIS

PHILIPPE LETURCQ

Devant la menace climatique, presque toutes les activités humaines font l'objet d'évaluations de leurs émissions de gaz à effet de serre (GES). Jusqu'à présent, la forêt, les usages de son bois, plus généralement ceux de la biomasse, n'ont retenu que peu d'attention de ce point de vue et leur rôle vis-à-vis du changement climatique a été caricaturé de manière excessive. Parmi les raisons de cette exception, figure l'absence d'une méthode simple de comptabilité carbone applicable aux peuplements forestiers, milieux vivants dont l'évolution, selon les essences, les stations, le climat et les pratiques sylvicoles est souvent considérée, à tort, comme trop difficile à quantifier. Par facilité, beaucoup de forestiers, d'énergéticiens, d'industriels et de responsables politiques se sont ralliés au concept réducteur de « neutralité carbone », selon lequel l'utilisation de biomasse ligneuse serait *intrinsèquement* sans incidence sur l'effet de serre atmosphérique, sous condition de gestion durable des forêts.

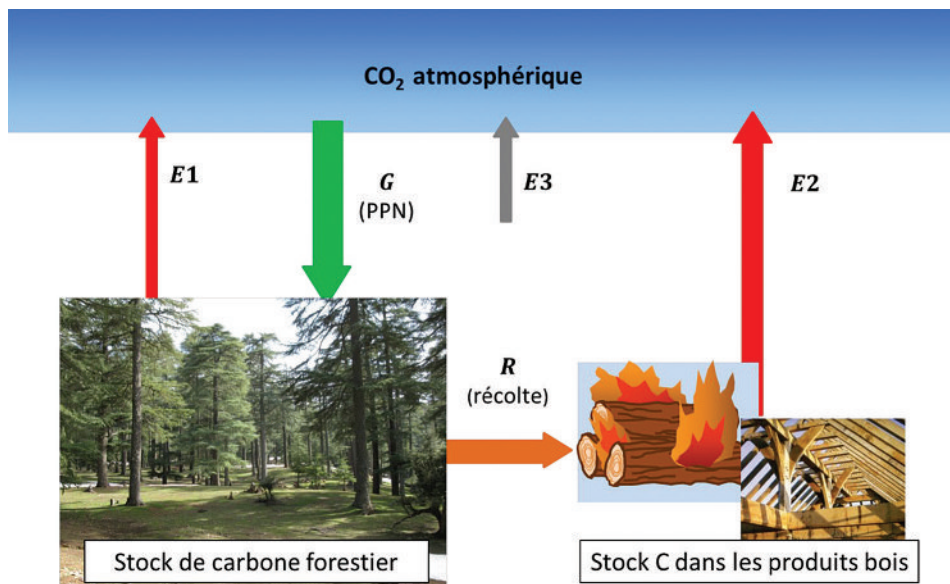
De fait, les politiques forestières et environnementales de nombreux pays, notamment européens, reposent encore sur ce concept infondé de « neutralité ». Les alertes lancées de manière répétée par la communauté scientifique, en particulier à propos de l'usage immodéré du bois comme source d'énergie (cf., par exemple, Beddington *et al.*, 2017 ; Van Ypersele *et al.*, 2021), restent peu audibles en l'absence d'une description raisonnée mais simple des échanges de carbone entre le système forêt-bois et l'atmosphère, compréhensible par le plus grand nombre. C'est une telle description que propose cet article, à partir des fondamentaux.

STOCKS ET FLUX DE CARBONE DANS LA FORÊT ET LES FILIÈRES D'UTILISATION DU BOIS

Un inventaire sommaire des échanges de carbone (ou de CO_2) entre la forêt, les produits bois qui en sont issus, et l'atmosphère est présenté par la figure 1 (p. 526) ; la distinction entre le carbone (C) et le dioxyde de carbone (CO_2) est implicite, avec la correspondance de masse : 12 grammes de C $\approx$ 44 grammes de CO_2 . Le périmètre forestier considéré est quelconque : il peut s'agir d'une petite chênaie comme de l'ensemble de la forêt française. G représente la productivité primaire nette (PPN), c'est-à-dire le flux annuel de carbone puisé dans l'atmosphère pour la photosynthèse de la biomasse, notamment ligneuse, E1 est l'émission provenant de la décomposition de la nécromasse forestière et R le flux de carbone emporté par le bois récolté. E2 est l'émission résultant de l'usage du bois comme combustible ou de la combustion ou décomposition des déchets d'industrie et des produits en fin de vie. Un flux additionnel E3 rassemble les émissions « extrinsèques » de carbone d'origine fossile intervenant dans les opérations sylvicoles, l'exploitation forestière, le transport des bois, la fabrication des produits, etc. Tous ces flux sont quantifiables sur une base annuelle. Deux stocks de carbone doivent être considérés, l'un dans la forêt, l'autre dans les produits bois.

Considérons, pour le moment, les seuls flux du carbone « intrinsèque » ou encore « biogénique », c'est-à-dire constitutif de la biomasse. La productivité primaire nette G peut être plus grande ou plus petite que la somme des flux d'émission E_1 et E_2 . Dans le premier cas, la forêt et ses produits bois se comportent en puits de carbone vis-à-vis de l'atmosphère, ce qui modère l'augmentation de l'effet de serre. Dans le second, le système « forêt-bois » est source de carbone. Il y a « neutralité » si G est strictement égal à la somme $E_1 + E_2$, ce qui n'est qu'un cas particulier.

FIGURE 1 REPRÉSENTATION SCHÉMATIQUE DU SYSTÈME « FORÊT-BOIS »



À titre d'illustration, les relevés de terrain de l'Inventaire forestier national (IFN), conduits par l'Institut national de l'information géographique et forestière (IGN), permettent d'estimer, en moyennes pour les années récentes, que la forêt française métropolitaine capte de l'ordre de 45 millions de tonnes de carbone par an ($G \approx 45 \text{ MtC/an}$) et émet $5,5 \text{ MtC/an}$ (E_1), la récolte représentant environ $15,5 \text{ MtC/an}$ (R). Le stock de carbone forestier s'accroît donc d'à peu près 24 MtC/an ($G - E_1 - R$) avec la ventilation approximative : $18,5 \text{ MtC/an}$ dans la matière ligneuse et $5,5 \text{ MtC/an}$ dans la litière et le sol. Le stock de carbone dans les produits bois n'augmentant pas significativement ($< 1 \text{ MtC/an}$), on est amené à conclure que l'émission E_2 est à peine inférieure au contenu carbone de la récolte annuelle. Cette émission peut être ventilée, toujours approximativement, en $8,5 \text{ MtC/an}$ pour la combustion directe de bois pour le chauffage et l'énergie et $6,5 \text{ MtC/an}$ pour la combustion ou la décomposition des déchets d'industrie du bois et des produits bois en fin de vie. On estime donc le puits de carbone à $24,5 \text{ MtC/an}$ ($G - E_1 - E_2$), hors émissions extrinsèques annexes, et à 22 MtC/an en prenant en compte ces dernières, évaluées indépendamment ($E_3 \approx 2,5 \text{ MtC/an}$). Ces valeurs de « puits », dont la précision apparente n'est due qu'à un souci de cohérence arithmétique, sont en accord raisonnable avec les estimations d'autres auteurs (Roux et Dhôte, 2017 ; du Bus de Warnaffe et Angerand, 2020).

L'estimation d'un puits de 22 MtC/an correspond à une capture nette annuelle dans l'atmosphère de 80 millions de tonnes de CO₂. Selon le rapport national d'inventaire pour la France au titre de la

Convention cadre des Nations-Unies sur les Changements Climatiques (CITEPA, 2020), les quantités de CO₂ physiquement émises à l'intérieur du pays sont actuellement de l'ordre de 300 MtCO₂/an, chiffre net tenant compte des puits. Ainsi, la forêt métropolitaine compense, à elle seule, environ 20 % des émissions nationales de CO₂. Devant la menace climatique, on devrait, bien sûr, réduire les émissions de CO₂ d'origine fossile, mais aussi, au moins à première vue, accroître la capture et le stockage de carbone, non diminuer le puits forestier — et le stock forestier — en augmentant les récoltes. Ce n'est pas l'option qui a été choisie, jusqu'à présent.

L'ASSERTION DE « NEUTRALITÉ CARBONE »

En effet, les professionnels concernés et les décideurs politiques ont préféré se raccrocher à l'idée que, dans une filière forêt-bois gérée de manière durable, les émissions de carbone biogénique provenant de la combustion ou de la décomposition du bois seraient compensées par la capture dans l'atmosphère du carbone nécessaire à la photosynthèse de matière ligneuse. C'est le cas particulier de la « neutralité carbone », évoqué plus haut, qui n'est pas irréaliste mais ne se rencontre qu'exceptionnellement. Ce concept de neutralité carbone des usages du bois est pervers : il conduit à postuler que l'emploi du bois à la place d'autres combustibles et d'autres matériaux « évite » les émissions qui leur sont liées en laissant dans l'ombre les émissions biogéniques attachées à cet emploi. Ce postulat incite à un développement inconsidéré et incontrôlé de l'usage du bois, et, en amont, à une augmentation des récoltes : les émissions intrinsèques étant considérées comme nulles par compensation, seules les émissions extrinsèques (E₃) sont comptées, ce qui confère un avantage immérité aux solutions « bois » lorsqu'on se préoccupe des impacts climatiques. Cette vision simpliste des choses est malheureusement actée dans de nombreux textes réglementaires, en Europe, aux États-Unis et dans beaucoup d'autres pays, au mépris de la réalité. Par exemple, les directives européennes relatives aux énergies renouvelables spécifient que « le facteur d'émission de la biomasse est égal à zéro » (Directive 2003/87/CE) et que « les émissions résultant du combustible utilisé sont considérées comme nulles pour les combustibles issus de la biomasse » (Directive 2018/2001), comme si la biomasse ne contenait pas de carbone ! Ces directives sont transcrites dans la Loi, en sorte que les bases de données utilisées pour établir les bilans « carbone » d'une activité, d'une entreprise ou d'un territoire affichent toujours « zéro » pour les facteurs d'émission intrinsèques des produits issus de la biomasse et, en particulier, du bois. Ainsi, en totale incohérence, la France, comme bien d'autres pays, déclare annuellement à l'ONU ses émissions issues de la biomasse (traités internationaux et règles de comptabilité du GIEC/IPCC⁽¹⁾) : 63 MtCO₂ en 2018, par exemple, soit plus de 20 % des émissions nationales de CO₂ (CITEPA, 2020), mais feint de les ignorer à l'intérieur de l'hexagone.

L'assertion de neutralité carbone est évidemment fautive dans son acception générale. Elle est trompeuse car elle postule l'identité de processus de capture et d'émission de carbone qui sont en réalité indépendants, ni égaux, ni synchrones. Elle n'est d'ailleurs pas compatible avec le constat que la forêt française est un important puits de carbone. Comme le montre la figure 1 (p. 526), les émissions annexes (E₃) étant mises à part, la neutralité carbone n'existe que dans le cas particulier où le flux de carbone capté (G) égale à tout moment la somme des émissions E₁ et E₂. Mais alors, le stock total de carbone dans la forêt et dans les produits bois, ne peut varier. Réciproquement, si le stock ne varie pas, c'est qu'il y a neutralité. La neutralité n'existe donc que dans des conditions de régime permanent statique, ce qui restreint considérablement l'intérêt du concept. Même dans ces conditions, interpréter la « neutralité » comme l'absence d'impact « GES » de la récolte et de l'utilisation du bois est une grave erreur : l'émission E₂ existe toujours ; sans récolte et donc sans utilisation du bois, le système forêt-bois ne serait plus neutre mais bien « puits » et l'annulation de ce puits dont dépend la « neutralité » implique un « manque à capter » qui doit

(1) GIEC/IPCC : Groupe d'experts International sur l'Évolution du Climat / Intergovernmental Panel on Climate Change.

être compté au passif dans le bilan carbone. Cependant, le concept de « neutralité » reste très prégnant et pollue nombre des analyses du rôle potentiel de la forêt et de l'utilisation de son bois dans l'atténuation du changement climatique. Pour s'en affranchir, un retour aux sources s'impose.

QUELQUES DONNÉES FACTUELLES

Le bois, comme toute biomasse, contient du carbone, beaucoup de carbone, environ 50 % en masse anhydre. La combustion de 1 kilogramme de matière ligneuse sèche émet typiquement 1,83 kg de dioxyde de carbone (0,5 kg de carbone) en libérant une énergie de 16,4 mégajoules (MJ). Le facteur d'émission du bois, défini comme la masse de CO₂ émise par unité de chaleur dégagée, est donc de 112 g CO₂/MJ : c'est la valeur-type retenue par le GIEC/IPCC (2006), non « zéro » comme l'affirment les directives européennes précitées. Ce facteur d'émission est plus élevé que celui de tout autre combustible.

Une autre réalité incontournable est que l'exploitation forestière et l'utilisation des bois récoltés renvoient dans l'atmosphère des quantités considérables de carbone. Les pertes ligneuses à l'abattage, qui comprennent les menus bois, les purges, les souches et racines, et la part du bois récolté destinée à la trituration (bois d'industrie) ou à l'énergie rendent leur carbone à l'atmosphère à relativement court terme (ordre de grandeur de la décennie). Seul le bois utilisé en menuiserie ou en charpente (bois d'œuvre) peut être considéré comme durable au regard d'horizons de temps compatibles avec les échéances climatiques (2050 : émission nette totale « zéro » en Europe, 2100 : limitation à 2 °C de l'élévation de température globale). Dans le cas de chênes de qualité, par exemple, le volume de grume est un peu moins de 50 % du volume ligneux total (Loustau, 2004) et le volume de sciages représente 41 à 45 % de celui de la grume (FCBA, 2020). Dans ces conditions, on doit considérer que de l'ordre du cinquième seulement de la masse ligneuse (et du contenu carbone) des arbres abattus peut être durablement conservé, dans les meilleurs cas. Encore faut-il considérer que la récolte ne se limite que rarement à des arbres individuellement choisis et que, pour un arbre de qualité, il peut s'en trouver dix qui seront impropres à fournir du bois d'œuvre et sont néanmoins abattus. Ainsi, contrairement à une idée répandue, on ne stocke pas de carbone par un produit de bois d'œuvre : on en déstocke !

Certes, les arbres qu'on abat sont, en règle générale, remplacés. Mais il faut compter d'ordinaire plusieurs dizaines d'années, parfois plusieurs siècles avant que le stock de carbone initial ne soit reconstitué et attendre plus longtemps encore avant que le stock qu'on aurait fini par accumuler en l'absence de coupe soit égalé par le peuplement en régénération : en abattant les arbres, on a supprimé des capteurs du carbone atmosphérique et le « manque à capter » qui en résulte doit être porté au passif du bilan carbone de la coupe.

EMPREINTE CARBONE

Par définition, l'empreinte carbone est la masse nette de carbone échangée entre le système considéré et l'atmosphère sur un intervalle de temps choisi. Comme la forêt et les filières d'utilisation du bois n'échangent de carbone biogénique qu'avec l'atmosphère, l'empreinte carbone « intrinsèque » s'identifie à la variation du stock de carbone dans le système forêt-bois sur la période de temps considérée. Cette empreinte intrinsèque peut être positive ou négative selon que le stock de carbone s'est accru (capture nette), ou a décru (émission nette)⁽²⁾. À l'empreinte intrinsèque,

(2) Le rôle central attribué à la variation du stock de carbone biogénique dans la description des échanges de carbone avec l'atmosphère conduit à retenir la convention de signe naturelle : capture (+), émission (-), convention qui est contraire à celle qui est le plus souvent utilisée dans la littérature. La difficulté est mineure.

il convient d'ajouter une empreinte extrinsèque, toujours négative, liée à la consommation d'énergie fossile pour l'exploitation forestière, le transport, la fabrication des produits, etc., ainsi que les crédits ou débits « GES » d'éventuelles substitutions de produits bois à des produits « non ligneux ». C'est l'empreinte carbone globale, évaluée sur une période de temps définie, qui chiffre l'impact « GES » sur cette période. Comme l'effet de toute action se mesure par rapport à ce qui se passerait en l'absence d'action, l'empreinte carbone d'une action quelconque s'obtient en faisant la différence des empreintes carbone globales évaluées avec et sans action, sur la même période de temps.

Ces rappels de principes méthodologiques peuvent paraître superflus, mais c'est pour ne pas les avoir respectés, notamment en ce qui concerne le choix de la référence pour la variation du stock de carbone (Johnson et Tschudi, 2012), qu'ont pu être proposées des orientations pour la gestion forestière et l'utilisation des bois qui sont en réalité contre-productives pour l'atténuation du changement climatique.

ÉVOLUTION DU STOCK DE CARBONE FORESTIER

Évolution libre

La variation du stock de carbone forestier à partir de la naissance d'une forêt peut être très complexe dans le détail mais, en général, sa forme est d'allure sigmoïdale, quasi exponentielle dès que le couvert est fermé, au moins si les prélèvements, par éclaircie par exemple, sont réguliers et de faible importance. Cette variation est représentée sur la figure 2a (p. 530).

Pour rester simple, on fait ici abstraction de modifications du stock de carbone dans la litière et le sol, en sorte que la variation représentée est essentiellement celle du contenu carbone de la biomasse ligneuse et de la nécromasse. Cette évolution conduit en principe, en l'absence de coupe, à un état d'équilibre de la forêt défini par l'égalité entre la productivité biologique (G) et l'évasion de carbone par décomposition de la nécromasse (E₁). La croissance du stock de carbone vers sa valeur asymptotique finale peut être caractérisée, en première approximation, par une constante de temps τ qu'on retient comme unité de l'axe du temps. Les valeurs de τ se chiffrent d'ordinaire en décennies ou siècles. Des ordres de grandeur types sont ainsi de 30 ans pour des peuplements de Mélèze ou de Pin sylvestre, de 50 ans pour de l'Épicéa ou du Douglas, de 70 à 100 ans pour du Hêtre ou du Chêne. Cette vision de l'évolution d'une forêt est évidemment très simplifiée, elle est suffisante pour le propos. Le stock de carbone forestier représente, à tout moment, l'empreinte carbone intrinsèque de la forêt comptée à partir de son origine. Tant que le stock reste en croissance, la forêt joue un rôle modérateur vis-à-vis de l'augmentation de l'effet de serre.

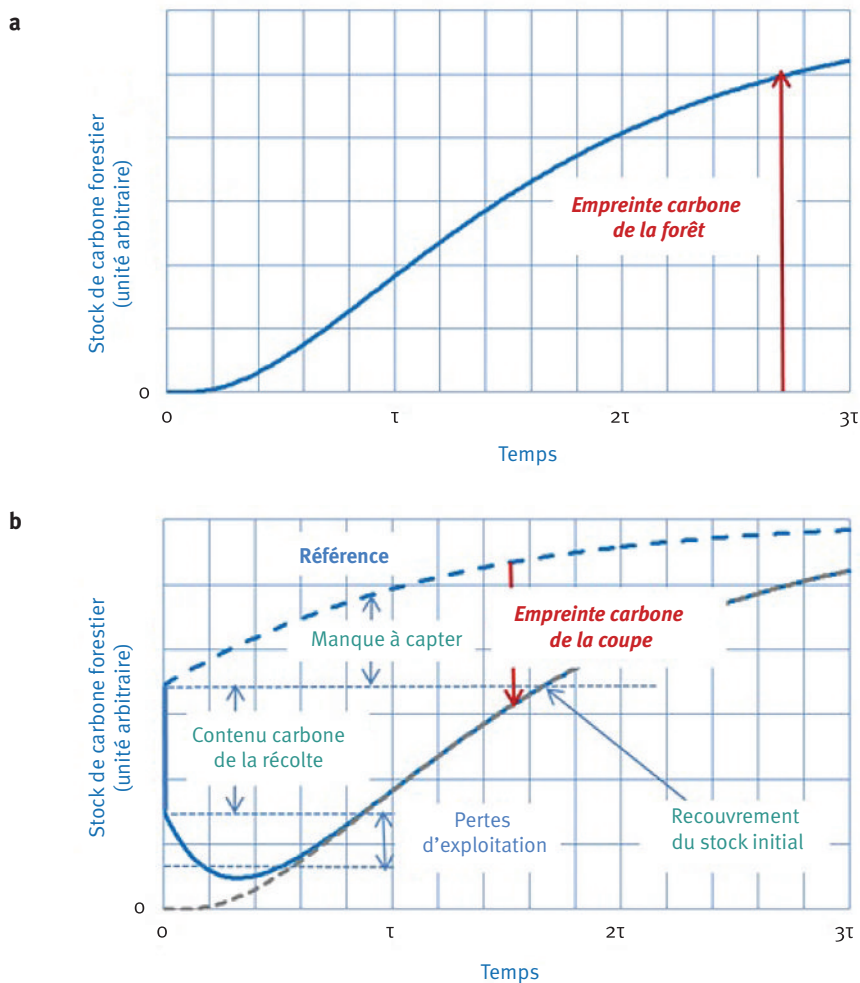
Évolution après coupe

La figure 2b (p. 530) illustre les conséquences d'une coupe intervenant à un moment choisi de l'évolution de la forêt, l'origine des temps étant déplacée au moment de la coupe. La variation du stock de carbone forestier représentée est relative à l'emprise de la coupe. Le stock est diminué, de manière quasi instantanée, du contenu carbone du bois récolté. La coupe s'accompagne de pertes d'exploitation, branchages, souches, racines, qui s'ajoutent à la nécromasse préexistante. La nécromasse (pertes d'exploitation incluses) se décompose progressivement, avec une constante de temps généralement brève vis-à-vis de la constante de temps τ , en sorte que le stock de carbone ligneux sur l'emprise de la coupe tendrait vers zéro s'il n'y avait régénération. Normalement, après coupe, la forêt se reconstitue, naturellement ou par plantation. Si la régénération s'effectue à l'identique (cf. tireté gris sur la figure 2b), c'est-à-dire si les essences, la fertilité des stations, le climat et la gestion forestière demeurent inchangés, la nouvelle croissance du stock devient vite

semblable, avec décalage temporel, à celle qu'on aurait observée en l'absence de coupe (trait interrompu bleu) et on doit parvenir asymptotiquement au même stock final.

FIGURE 2

**ÉVOLUTION-TYPE DU STOCK DE CARBONE FORESTIER :
(a) ÉVOLUTION LIBRE ; (b) ÉVOLUTION APRÈS COUPE**



L'empreinte carbone intrinsèque de la coupe, comptée à partir du moment de l'intervention, est la différence entre le stock actuel et celui qu'on aurait observé en l'absence de coupe (référence). Cette empreinte, fonction du temps, est négative et, en valeur absolue, correspond initialement au contenu carbone de la récolte, augmente transitoirement en raison de la décomposition de la nécromasse et du manque à capter résultant de la suppression des arbres capteurs, puis diminue lorsque la régénération s'affirme et tend vers zéro longtemps après coupe. On finit donc par trouver une situation de neutralité carbone comme limite asymptotique. Compte tenu des valeurs de τ pour les peuplements forestiers les plus courants (plusieurs décennies ou même siècles), l'intérêt de cette

« neutralité » est anecdotique au regard des échéances fixées dans la lutte contre le changement climatique (trente à quatre-vingts ans). Cette vision des choses est largement acceptée (*cf.*, par exemple, Mitchell *et al.*, 2012 ; Ter-Mikaelian *et al.*, 2015 ; Camia *et al.*, 2021).

Toutefois, la régénération à l'identique n'est nullement obligée. On peut très bien opter, après coupe, pour un changement d'essences ou de gestion. Alors, l'empreinte carbone intrinsèque de la coupe ne tend plus asymptotiquement vers zéro mais vers une valeur positive ou négative selon que la reconstitution est plus ou moins dynamique que la constitution du peuplement d'origine. Mais dans tous les cas, l'empreinte carbone, telle qu'on vient de la décrire, relève de la spéculation puisqu'elle dépend à la fois de l'hypothétique variation du stock forestier de référence et de l'évolution future de la forêt. Seul le contenu carbone du bois récolté est bien déterminé et doit être retenu comme première estimation de l'empreinte carbone de la coupe à court terme. Cette première estimation peut être complétée en prenant en compte la décomposition de la nécromasse laissée en place au moment de la coupe, raisonnablement prévisible. Par contre, la reconstitution du peuplement exploité et l'évolution du « manque à capter » ne devraient être évaluées qu'en termes probabilistes, en tenant compte, notamment, de la fréquence et de l'importance des aléas climatiques, météorologiques, sanitaires, des risques d'incendie, etc.

EMPREINTE CARBONE DE LA COUPE ET DE L'UTILISATION DES BOIS RÉCOLTÉS

Si l'on s'en tient pourtant, « par défaut », à l'hypothèse de régénération « à l'identique », la description très simple que donne la figure 2b de l'évolution du stock de carbone forestier permet d'assurer que l'empreinte carbone intrinsèque de la coupe aura le type de variation représenté sur la figure 3a (p. 532). L'extremum peut être plus ou moins accusé, et sa date d'intervention plus ou moins tardive, selon, d'une part, la nécromasse restant après coupe et la constante de temps de sa décomposition, d'autre part, le délai apporté à la reconstitution du peuplement.

Dans l'hypothèse d'une utilisation immédiate du bois comme combustible, le stock de carbone du système forêt-bois reste celui de la seule forêt. L'empreinte carbone intrinsèque de l'utilisation du bois pour l'énergie est alors identique à celle de la coupe (figure 3b, p. 532, courbe rouge). On est loin du « zéro » auquel se réfèrent les politiques forestières et de transition énergétique !

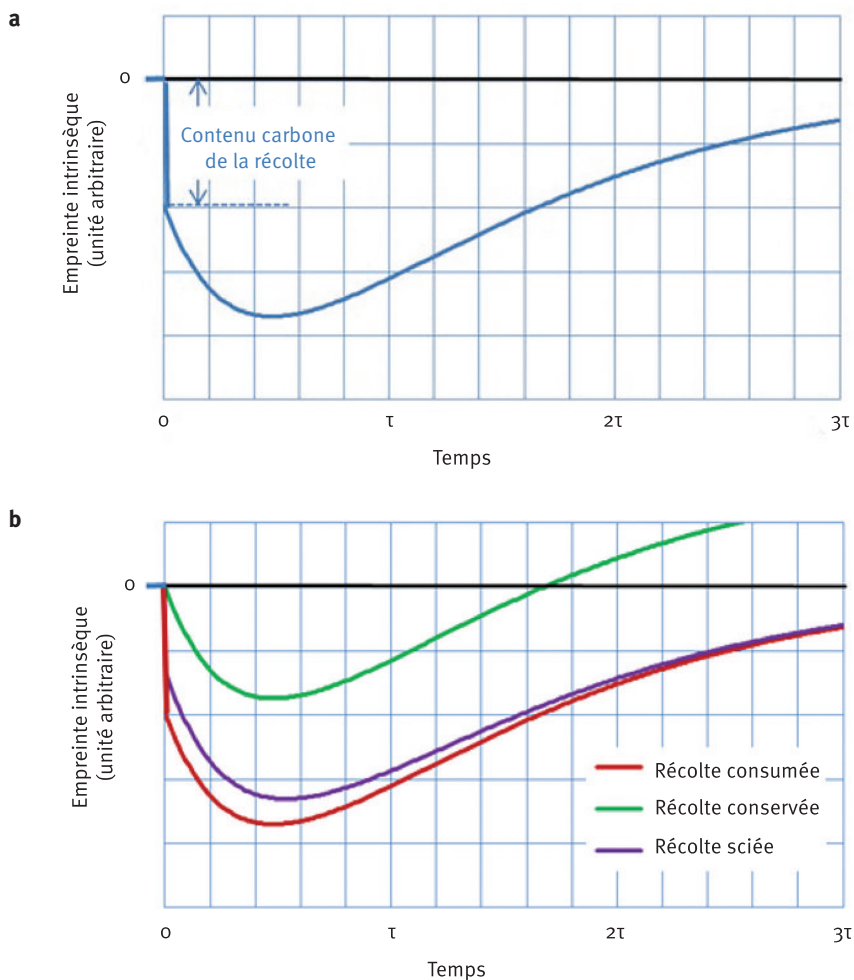
Si le bois récolté pouvait être totalement et définitivement conservé, son contenu carbone s'ajouterait au stock de carbone forestier. L'empreinte carbone dans ces conditions se déduirait de la précédente par une translation suivant l'axe des ordonnées d'amplitude égale au contenu carbone de la récolte (figure 3b, p. 532, courbe verte). Les tracés rouge et vert limitent donc la plage dans laquelle s'inscrit, de manière générale, l'empreinte carbone selon les proportions de bois utilisée pour l'énergie, vouée à décomposition ou réservée à des usages durables.

Cependant, même dans le cas d'une récolte de bois d'œuvre, les produits bois durables (sciages) représentent au mieux le tiers du volume de la récolte, les deux autres tiers (houppiers et déchets d'industrie) étant destinés à servir de combustible ou de matière première pour des usages à durée de vie relativement courte. Les produits nobles, parvenus au terme de leur usage, finissent eux-mêmes par rendre leur carbone à l'atmosphère, par combustion ou décomposition, en sorte que l'empreinte carbone d'une utilisation du bois comme matériau est généralement plus proche du tracé rouge que du tracé vert. Le tracé violet donne un exemple pour des produits sciés de durée de vie moyenne comparable à la constante de temps τ .

L'exploitation forestière et l'utilisation des bois ont donc une empreinte carbone négative, sauf options extrêmes telles que l'enfouissement de l'entière récolte (et encore ce ne serait qu'à long terme — *cf.* la courbe verte de la figure 3b — qu'un bénéfice « effet de serre » pourrait être attendu). Les filières d'exploitation du bois ne peuvent donc contribuer *directement* à l'atténuation du

changement climatique. La possibilité de substitution de produits bois à des combustibles ou des matériaux plus émissifs reste cependant à envisager.

FIGURE 3 **EMPREINTE CARBONE INTRINSÈQUE DE LA COUPE (a)**
ET EMPREINTES D'UTILISATIONS DIVERSES DU BOIS RÉCOLTÉ (b)



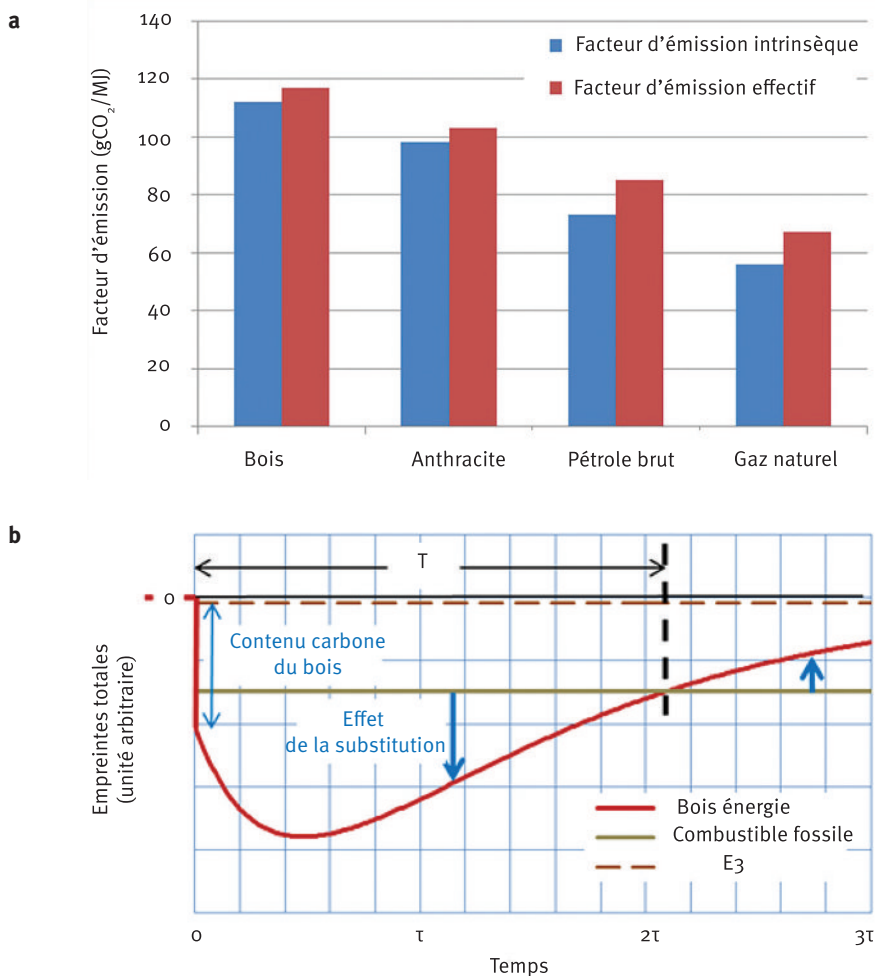
SUBSTITUTION DE BOIS À D'AUTRES COMBUSTIBLES

La figure 4a (p. 533) compare les facteurs d'émission des principaux combustibles, c'est-à-dire les quantités de gaz à effet de serre émises par unité d'énergie rendue. Les facteurs d'émission intrinsèques sont relatifs au carbone libéré lors de la combustion. Les facteurs d'émissions

effectifs tiennent compte des émissions extrinsèques qui sont liées aux opérations qui vont de l'exploitation ou de l'extraction des combustibles, à leur mise à disposition. Ces émissions « amont » sont très variables mais, en valeur relative, de peu d'importance. On a retenu ici les valeurs « par défaut » recommandées par le Joint Research Center (JRC) de la Commission européenne (Koffi *et al.*, 2017).

FIGURE 4

**FACTEURS D'ÉMISSION DES PRINCIPAUX COMBUSTIBLES (a)
ET EFFET DE LA SUBSTITUTION DE BOIS ÉNERGIE
À UN COMBUSTIBLE FOSSILE (CAS DU PÉTROLE) (b)**



La figure 4b ci-dessus met en évidence l'effet de la substitution de bois énergie à un combustible fossile, pétrole par exemple. On retrouve la variation de l'empreinte carbone du bois combustible (courbe rouge de la figure 3b p. 532), à un détail près : on a tenu compte, cette fois, de l'émission extrinsèque (E₃) qui pèse peu, en réalité, devant l'émission intrinsèque de combustion. L'empreinte carbone de l'utilisation d'un combustible fossile délivrant la même énergie que la

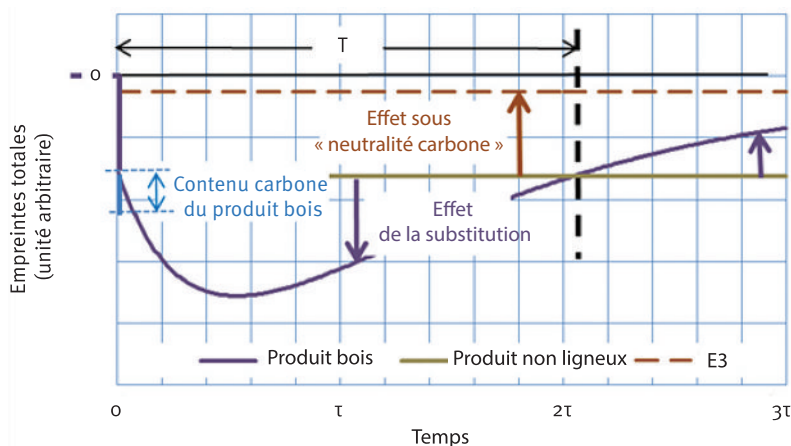
combustion de bois est formée au moment même de cette utilisation et est donc représentée par un simple échelon dont l'amplitude est réduite par rapport à l'empreinte initiale de l'utilisation du bois, le rapport d'amplitude étant celui des facteurs d'émission effectifs (cf. figure 4a, p. 533). L'empreinte du bois énergie apparaît ainsi plus profonde que celle du combustible fossile jusqu'à un horizon de temps T correspondant à l'intersection des courbes représentatives des deux empreintes. L'usage du bois énergie s'avère par contre globalement moins émissif au-delà du temps T qui repère la parité carbone des usages du bois et du combustible fossile. Ce temps est de l'ordre de 2τ dans l'exemple présent de la substitution de bois au pétrole. Il serait un peu inférieur à cette valeur dans le cas de la substitution au charbon, un peu supérieur dans le cas d'une substitution au gaz naturel.

Pour les valeurs courantes de τ allant de quelques dizaines d'années à 70 ou 100 ans ou même davantage l'espérance d'un bénéfice GES de l'emploi du bois en substitution de combustibles fossiles ne peut donc se concrétiser avant les échéances climatiques.

SUBSTITUTION DE BOIS À D'AUTRES MATÉRIAUX

La figure 5 (ci-dessous) obéit à la même logique que la précédente, mais sont ici comparées les empreintes carbone de produits bois et de produits non ligneux jugés échangeables en ce qui concerne la fonctionnalité et la durée d'usage. Les empreintes sont ici totales incluant, pour les produits bois (E_3), les émissions « amont » liées à l'exploitation, au transport et à la mise à disposition des bois bruts et les émissions « grises » de fabrication. L'illustration est celle d'une utilisation du bois récolté pour 1/3 en sciages de durée de vie comparable à la constante de temps principale τ et pour 2/3 en bois énergie non substitué (empreinte intrinsèque représentée sur la figure 3b p. 532, courbe violette). L'empreinte carbone des produits non ligneux substituables, métalliques par exemple, est représentée par une ligne horizontale dans la mesure où cette empreinte se trouve fixée aussitôt les produits fabriqués. Lorsque les courbes représentatives des empreintes bois et non ligneux sont sécantes, on voit, comme dans la substitution énergétique, qu'existe un temps T au-delà duquel une réduction des émissions globales par substitution peut être espérée. Pour des empreintes de produits non ligneux supérieures, en valeur absolue, à l'extremum de l'empreinte des produits bois, la substitution est toujours bénéfique quel que soit l'horizon de temps que l'on se fixe.

FIGURE 5 EFFET DE LA SUBSTITUTION D'UN PRODUIT BOIS À UN PRODUIT NON LIGNEUX



Dans la pratique actuelle de comptabilité carbone, on décrit souvent l'effet de la substitution, c'est-à-dire la variation d'émission attendue, gain ou perte « GES », par son rapport au contenu carbone du produit bois. Ce rapport est désigné comme « facteur de déplacement » ou « coefficient de substitution ». Les valeurs des facteurs de déplacement habituellement avancées pour des substitutions « matériaux » dans le domaine de la construction se situent entre une et quelques « tC/tC » (tonnes de carbone par tonne de carbone contenue dans les produits bois) mais, sous hypothèse de neutralité carbone, correspondent à la différence entre l'empreinte carbone du produit non ligneux et la seule émission extrinsèque E3 du produit bois. Dans le cas illustré par la figure 5 (p. 534), le facteur de déplacement conventionnel serait de 2,1 tC/tC, valeur type avancée par Sathre et O'Connor (2010) pour le secteur du bâtiment, invitant à une augmentation de l'utilisation du bois, alors que le facteur de déplacement « instantané », calculé à partir des empreintes carbone réelles, est longtemps négatif et resterait, au-delà du temps T, toujours inférieur à celui qu'on prétend en s'appuyant sur l'assertion de neutralité carbone.

CONCLUSION

L'exploitation forestière et l'utilisation des bois récoltés sont, en elles-mêmes, émettrices de gaz à effet de serre, dioxyde de carbone essentiellement. La substitution de bois à d'autres combustibles ou d'autres matériaux, que beaucoup d'acteurs des filières forêt-bois et de décideurs politiques prétendent plus efficace pour limiter l'effet de serre que la capture de carbone et son stockage direct dans les arbres vifs est en réalité contreproductive (substitution « énergétique ») ou son résultat est, tout au moins, grandement surestimé (substitution « matériau »).

Augmenter les prélèvements pour faire jouer des effets de substitution bénéfiques est donc une option inconséquente (Leturcq, 2020). Cela ne veut pas dire que l'utilisation du bois produit par les forêts n'est pas légitime, mais seulement que cette utilisation ne peut être justifiée par des objectifs d'atténuation du changement climatique. L'exploitation forestière et l'usage des bois récoltés devraient seulement répondre à des impératifs techniques, économiques, sociaux ou sociétaux, tout en étant soumis, comme toutes les autres activités humaines, à une comptabilité carbone précise permettant de juger, cas par cas, de leur bien-fondé (postuler la neutralité carbone du bois n'est pas une pratique admissible de comptabilité carbone).

Par contre, pour permettre à la forêt de jouer un rôle important et peut-être décisif d'atténuation du changement climatique, le moyen direct est d'accroître les espaces boisés et les volumes de bois sur pied, c'est-à-dire de stocker du carbone en forêt et, sous condition d'un bénéfice de substitution indiscutable, dans des produits bois. Pour être effective, cette stratégie doit reposer sur la reforestation et la restauration de forêts naturelles plutôt que sur des plantations à objectif de production (Moomaw *et al.*, 2019 ; Lewis *et al.*, 2019).

Philippe LETURCQ

Professeur des Universités (retraité)

Ancien chercheur du

Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes du CNRS

Tuc de Grand

F-09230 BÉDEILLE

(phleturcq@hotmail.fr)

BIBLIOGRAPHIE

- BEDDINGTON J. et quatorze autres scientifiques, 2017. *EU must not burn the world's forests for 'renewable' energy. Letters* [En ligne] disponible sur : <https://www.theguardian.com/environment/2017/dec/14/eu-must-not-burn-the-worlds-forests-for-renewable-energy>
- CAMIA A., GIUNTOLI J., JONSSON K., ROBERT N., CAZZANIGA N., JASINEVIČIUS G., AVITABILE V., GRASSI G., BARREDO CANO J.I., MUBAREKA S., 2021. *The use of woody biomass for energy purposes in the EU*. JRC Science for policy report. Luxembourg: Publications Office of the European Commission. doi:10.2760/831621, JRC122719.
- CITEPA, 2020. *Inventaire des émissions de gaz à effet de serre en France de 1990 à 2018*. 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.
- Directive 2003/87/CE du Parlement européen et du Conseil du 13 octobre 2003 établissant un système d'échange de quotas d'émission de gaz à effet de serre dans la Communauté. *Journal officiel de l'Union européenne*, 25.10.2003, Annexe IV, page L 275/44.
- Directive 2018/2001 du Parlement européen et du Conseil du 11 décembre 2018 relative à la promotion de l'utilisation de l'énergie produite à partir de sources renouvelables. *Journal officiel de l'Union européenne*, 21.12.2018, Annexe VI, page L 328/185.
- du BUS de WARNAFFE G., ANGERAND S., 2020. *Gestion forestière et changement climatique, une nouvelle approche de la stratégie nationale d'atténuation*. Étude Fern-Canopée. 80 p.
- FCBA, 2020. *Memento 2020*. FCBA Institut technologique. [En ligne] disponible sur : www.fcba.fr
- GIEC/IPCC, 2006. *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Published: IGES, Japan. Volume 2: Energy, Chapter 2: Stationary combustion.
- JOHNSON E., TSCHUDI D., 2012. Baseline effects on carbon footprints of biofuels: The case of wood. *Environmental Impact Assessment Review*, 37, pp. 12-17.
- KOFFI B., CERUTTI A., DUERR M., IANCU A., KONA A., JANSSENS-MAENHOUT G., 2017. *CoM Default Emission Factors for the Member States of the European Union*. Version 2017. European Commission, Joint Research Centre (JRC). [En ligne] disponible sur : <http://data.europa.eu/89h/jrc-com-ef-comw-ef-20170>. (consulté le 6 février 2020).
- LETURCQ Ph., 2020. GHG displacement factors of harvested wood products: the myth of substitution. *Scientific Reports*, 10, 20752. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-77527-8>.
- LEWIS S.L., WHEELER C.E., MOTCHARD E.T.A., KOCH A., 2019. Restoring natural forests is the best way to remove atmospheric carbon. *Nature*, 568, pp. 25-28.
- LOUSTAU D. (coordinateur), 2004. *Rapport final du projet CARBOFOR. Séquestration de carbone dans les grands écosystèmes forestiers en France*. Bordeaux : INRA - Unité EPHYSE. 138 p.
- MITCHELL S.R., MARK E.H., O'CONNELL K.E.B., 2012. Carbon debt and carbon sequestration parity in forest bioenergy production. *GCB Bioenergy*. doi: 10.1111/j.1757-1707.2012.01173.x
- MOOMAW W.R., MASINO S.A., FAISON E.K., 2019. Intact forests in the United States: Proforestation mitigates climate change and serves the greatest good. *Front. For. Glob. Change*, 2, 27. doi: 10.3389/ffgc.2019.00027.
- ROUX A., DHÔTE J.-F. (Coordinateurs) et al., 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.
- SATHRE R., O'CONNOR J., 2010. Meta-analysis of greenhouse gas displacement factors of wood product substitution. *Environmental Science & Policy*, 13 (2), pp. 104-114.
- TER-MIKHAELIAN M.T., COLOMBO S.J., CHEN J., 2015. The Burning Question: Does Forest Energy Reduce Carbon Emissions ? A Review of Common Misconceptions about Forest Carbon Accounting. *Journal of Forestry*, 113 (1), pp. 57-68.
- VAN YPERSELE J.-P. et cinq cents autres scientifiques, 2020. *It's time to end subsidies for burning wood from forests*. [En ligne] disponible sur : <https://www.climatechangenews.com/2021/02/11/time-end-subsidies-burning-wood-forests/>

EMPREINTE CARBONE DE LA FORÊT ET DE L'UTILISATION DE SON BOIS (Résumé)

Une idée répandue est que le remplacement par du bois des combustibles fossiles et des matériaux énergivores est une meilleure stratégie pour atténuer le changement climatique que le stockage de carbone dans les forêts. Cette opinion découle de l'assertion de « neutralité carbone de la biomasse » à laquelle se réfèrent, à tort, les politiques forestière et énergétique d'un grand nombre de pays, notamment en Europe. Les objections de nombreux scientifiques sont restées jusqu'à présent sans effet, sans doute par manque d'une description suffisamment simple, compréhensible par tous, de la véritable empreinte carbone des produits ligneux récoltés. Cet article montre, à partir des fondamentaux, que l'augmentation de la récolte et des usages du bois est contre-productive pour les objectifs d'atténuation du changement climatique, notamment lorsque le bois est utilisé comme combustible.

CARBON FOOTPRINT OF THE FOREST AND ITS WOOD USES (Abstract)

A commonly held idea states that replacing fossil fuels and energy-intensive materials with wood is a better strategy than carbon storage in forests for mitigating climate change. This opinion stems from the assertion of "biomass carbon neutrality" to which the forestry and energy policies of many countries wrongly refer, especially in Europe. The objections of many scientists have remained ineffective so far, possibly due to the lack of a sufficiently simple and understandable-by-all description of the true carbon footprint of harvested wood products. Based on basic knowledge, this article shows that increasing wood harvesting and its uses is counterproductive as regards climate change mitigation goals, especially when wood is used as fuel.



Licence Creative Commons

Attribution + Pas de Modification + Pas d'Utilisation Commerciale (BY ND NC)