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

Philippe Leturcq

Professeur des Universités (retraité)
Ancien chercheur du
Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes du CNRS

Décembre 2019

Janvier 2020 (révisé)

EMPREINTE CARBONE DE LA FORÊT

ET DE L'UTILISATION DE SON BOIS

Philippe Leturcq

Professeur des Universités (retraité)
Ancien chercheur du
Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes du CNRS

Lieu-dit « Tuc de Grand », 09230 BÉDEILLE
phleturcq@hotmail.fr

AVANT-PROPOS

Devant la menace climatique, presque toutes les activités humaines font l'objet d'évaluations des émissions de gaz à effet de serre qui leur sont liées (CCNUCC 1998, LTECV 2015). Jusqu'à présent, la forêt, les usages de son bois, plus généralement ceux de la biomasse, n'ont reçu que peu d'attention de ce point de vue et leur rôle vis-à-vis du changement climatique a été caricaturé de manière excessive (Searchinger et coll. 2009, Johnson 2009, Leturcq 2011, EEA 2011, Ter-Mikaelian et coll. 2015a). 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 rallient au concept de « neutralité carbone », réducteur et infondé, selon lequel l'utilisation de matière ligneuse, et de biomasse en général, serait intrinsèquement sans incidence sur l'effet de serre (Gustavsson et coll. 1995, IEA Bioenergy 2005). Un exemple frappant est celui de Directives européennes qui déclarent renouvelables les combustibles issus de la biomasse, dont le bois, et nulles leurs émissions de CO_2 à la combustion (EU 2003, EU 2009, EU 2018), ce qui permet

une augmentation inconsidérée et incontrôlée de l'usage de ces combustibles, sans égard pour son impact « effet de serre » réel et pour les dommages causés aux écosystèmes producteurs.

L'assertion de « neutralité carbone » n'est pas fausse dans tous les cas car elle peut résulter d'un équilibre voulu ou fortuit entre capture et émission de carbone dans le système constitué par la forêt et l'usage de son bois. Mais son invocation conduit à développer inconsidérément les usages combustibles du bois (et de la biomasse en général), au mépris de règles de comptabilité carbone qui sont certes imparfaites mais qui existent. Selon les recommandations du GIEC/IPCC pour les rapports nationaux d'inventaire de gaz à effet de serre, à défaut de bilan précis, tout le carbone des arbres abattus pour l'énergie doit être considéré comme émis dans l'atmosphère et comptabilisé comme tel l'année même de la récolte...(IPCC 1996a). Mais les tenants des bioénergies, consciemment ou non, profitent d'une disposition qui veut que, pour éviter une erreur de double compte, l'émission soit rapportée non dans la rubrique « énergie » mais dans celle de « utilisation des sols, changement d'affectation des sols et sylviculture », en déduction de la capture de carbone par les écosystèmes exploités (IPCC 1996b, IPCC 2006). Cette émission perd alors de sa lisibilité, accréditant l'idée que les usages énergétiques de la biomasse n'ont pas d'impact « effet de serre » (IPCC 2014, cf. note en bas de page 879 ; voir aussi : http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/faq/faq.html , question Q2-10). Aussi, la France et bien d'autres pays, se trouvent-ils, en matière de comptabilité carbone forestière, dans une situation de totale incohérence : d'un côté, conformément aux règles du GIEC/IPCC, les émissions de combustion de biomasse sont bien déclarées dans les rapports annuels à l'Organisation des Nations Unies [Pour la France et l'année 2017, par exemple, l'émission nette totale de CO_2 a été de 310 millions de tonnes, dont 65 millions (plus de 20%), proviennent de la combustion de biomasse (CITEPA 2019, cf. tableau 19, page 101)] ; de l'autre côté, ces émissions sont niées dans les politiques forestières et énergétiques, au nom de la « neutralité carbone ».

Ce document a pour socle un modèle « explicatif » de la dynamique du carbone forestier et de la formation de l'empreinte carbone, qui permet d'éclairer le rôle potentiel de la forêt et du bois dans la lutte contre l'augmentation de l'effet de serre et d'orienter les décisions d'action. L'intention est de décrire de manière compréhensible les échanges de carbone entre la forêt, d'une part, les produits bois qu'on en extrait d'autre part, l'atmosphère enfin, sans prétendre à la finesse de représentation et à l'exactitude quantitative de modèles numériques qui sont performants mais hermétiques pour le non-spécialiste en raison de leur complexité (Shifley et coll. 2017, Krinner et coll. 2005, Wernsdörfer et coll. 2012, Kurtz et coll. 2009, Sterman et coll. 2018). Pour ce faire, on relève que la dynamique du carbone forestier, en conséquence du principe de conservation, est linéaire et invariante sous réserve que les temps de résidence et autres temps caractéristiques de cette dynamique puissent être admis comme constants, sur des périodes de temps limitées au moins. Dans le cadre d'approximation ainsi défini, les variations des stocks et flux de carbone peuvent être décrites analytiquement, ce qui confère aux résultats une clarté et une généralité que ne permet pas une approche purement numérique.

Il convient naturellement de s'assurer que ce cadre d'approximation linéaire et invariant reste approprié, ce qui est vérifié dans la première partie du document où l'on fait appel aux tables de production classiques, en guise de données expérimentales, pour valider l'approche en ce qui concerne la biomasse ligneuse. Un modèle des échanges de carbone entre l'atmosphère, d'une part, la forêt et les filières d'utilisation de son bois, d'autre part, simple mais suffisant pour un objectif de compréhension, est présenté dans la deuxième partie et utilisé pour expliquer comment se forme l'empreinte carbone de la forêt et de l'utilisation de son bois. On met en évidence, dans la troisième partie, que les effets de substitution du bois à d'autres combustibles ou à d'autres matériaux, prétendument bénéfiques pour la réduction des émissions de gaz à effet de serre, sont en réalité contreproductifs (substitution énergétique) ou surestimés (substitution matériau). La quatrième et dernière partie du document présente, en utilisant un modèle plus complet pour accéder à des ordres de grandeur, des scénarios d'évolution de l'empreinte carbone de la forêt française selon diverses hypothèses de production biologique, d'intensité des prélèvements et d'usage des bois.

L’ensemble du document propose donc une autre conception du rôle de la forêt et de l’utilisation de son bois dans les échanges de carbone avec l’atmosphère, plus élaborée que celle qui découle de l’assertion naïve de « neutralité carbone ».

******

Table des matières

Avant-propos **page 3**

Première partie
Un modèle simple de la dynamique du carbone forestier **9**
I-1 Approximation linéaire invariante de la dynamique du carbone forestier 9
I-2 Le compartiment de biomasse ligneuse 11
I-3 Un modèle de croissance pour les peuplements mono-spécifiques équiennes 13
I-4 Extension aux grands ensembles forestiers 17
I-5 Conclusion 21

Deuxième partie
Dynamique du carbone forestier et formation de l'empreinte carbone **23**
II-1 Modèle simplifié à deux compartiments forestiers 24
II-2 Prélèvement continu constant 26
II-3 Prélèvement ponctuel, instantané 30
II-4 Conclusion 38

Troisième partie
Empreinte carbone des usages du bois **39**
III-1 Représentation des usages du bois 39
III-2 Empreinte carbone de l'usage du bois récolté 41
III-3 Bois combustible et substitution « énergétique » 42
III-4 Bois conservé et substitution « matériau » 46
III-5 Conclusion 50

Quatrième partie
Scénarios d'évolution pour la forêt de production française **53**
IV-1 Modèle utilisé 54
IV-2 Valeurs des paramètres et conditions initiales 55
IV-3 Un scénario « au fil de l'eau » 62
IV-4 Un scénario de croissance des prélèvements sur la période 2015-2050 66
IV-5 Substitution vs. puits de carbone 69
IV-6 Conclusion : Un scénario de décroissance des prélèvements pour l'énergie sur la période 2015-2050 71

Conclusion générale **75**

Références bibliographiques **85**

PREMIÈRE PARTIE

UN MODÈLE SIMPLE DE LA DYNAMIQUE DU CARBONE FORESTIER

La question posée dans cette première partie du document est celle de la validité, pour un objectif de compréhension, d'un modèle linéaire des échanges de carbone entre la forêt, les filières d'utilisation de son bois et l'atmosphère.

Après avoir rappelé en quoi consiste l'approximation linéaire pour les systèmes obéissant à une loi de conservation, on teste, sur des peuplements mono-spécifiques équiennes dans un premier temps, un modèle linéaire invariant de la dynamique du carbone lié à la biomasse ligneuse. Le choix de ce type de peuplements se justifie, à défaut de pouvoir soumettre la forêt à expérimentation, par l'existence de nombreuses tables de production le concernant. Ces tables procurent un support commode pour valider l'approche car, dressées à l'issue d'un traitement statistique de données de terrain, elles présentent comme simplement déterministes, par essence, par région climatiquement homogène et par indice de fertilité des stations, les évolutions échantillonnées de la production totale en volume ligneux à laquelle le stockage de carbone est directement proportionnel. De telles tables n'existent pas pour les peuplements mélangés ou des ensembles forestiers plus complexes, diversifiés en essences, stations et pratiques sylvicoles. A défaut, on montre par des exemples numériques que le modèle de croissance élaboré pour des peuplements mono-spécifiques équiennes reste applicable à tout ensemble forestier, avec un degré de confiance élevé, au moins sur des périodes de temps limitées.

I-1 Approximation linéaire invariante de la dynamique du carbone forestier

Le carbone forestier est réparti dans des « réservoirs » ou « compartiments » dont les principaux sont la matière ligneuse des arbres vifs, le bois mort sur pied ou au sol, les racines mortes, la biomasse non ligneuse, la litière et le sol, chacun de ces compartiments pouvant à son tour être subdivisé à volonté selon l'objectif poursuivi : branches, tige, racines, par exemple, pour les arbres vifs (IFN 2005). Les « produits bois » tirés de la forêt peuvent, de même, être considérés comme

constituant un ou plusieurs compartiments stockant du carbone. Les flux entrants et sortants des divers compartiments représentent les échanges de carbone. Cette conception est illustrée par les figures I-2, II-1, ou IV-1.

Pour chacun de ces compartiments, quel que soit son niveau hiérarchique, l'accroissement ou la diminution du stock de carbone Q par unité de temps résulte de la différence entre le flux de carbone entrant Φ_e entrant et le flux sortant Φ_s; il s'agit là d'une conséquence directe du principe de conservation (Lavoisier). L'approximation linéaire invariante consiste à exprimer le flux sortant Φ_s comme le rapport du stock Q à un temps τ de résidence (ou de transit) du carbone dans le compartiment et à admettre que ce paramètre τ est constant, indépendant du stock (linéarité) et du temps (invariance). On est conduit à la formulation suivante (figure I-1) :

$$\Phi_e = dQ/dt + \Phi_s \approx dQ/dt + Q/\tau$$

Figure I-1 – Formulation approchée, linéaire et invariante, de la dynamique du carbone dans un « compartiment » forestier

L'évolution du stock $Q(t)$ est donc solution d'une équation différentielle linéaire du premier ordre à paramètre constant. Cette solution s'écrit, quel que soit le flux entrant $\Phi_e(t)$ imposé :

$$Q(t) = \left\{Q_0 + \int_0^t \Phi_e(t')\, exp(t'/\tau)\, dt'\right\} exp(-t/\tau) \qquad \text{(I-1)}$$

où Q_0 représente le stock au temps $t = 0$ choisi pour origine. L'évolution du flux sortant $\Phi_s(t)$ se déduit de ce résultat en rapportant $Q(t)$ au temps de résidence τ. Dans la mesure où le flux reçu par chaque compartiment provient de celui ou de ceux qui le précèdent et où le flux sortant alimente le ou les compartiments suivants en une cascade unidirectionnelle, le calcul de la variation dans le temps du stock de carbone dans chaque compartiment et celle du stock d'ensemble est totalement explicite.

Sous réserve que les paramètres τ caractéristiques des divers compartiments soient effectivement constants, indépendants du stock et du temps, ou puissent être considérés comme tels (cf. paragraphe I-4), les propriétés générales des systèmes linéaires invariants s'appliquent à ces compartiments et à leur assemblage. Notamment :

- Lorsqu'un compartiment est alimenté par plusieurs flux, les variations du stock et du flux sortant s'obtiennent par superposition des variations déterminées pour chacun des flux entrants agissant isolément.
- Plus généralement, toute opération linéaire effectuée sur le flux d'entrée, multiplication par une constante, dérivation, intégration, implique la même opération sur le stock et sur le flux sortant.
- Etc.

Le lecteur pourra, au besoin, trouver des compléments d'information dans l'un ou l'autre des nombreux ouvrages d'enseignement traitant de la théorie des systèmes linéaires (par exemple, Arzelier 2010, Bossy 2014...).

I-2 Le compartiment de biomasse ligneuse

Le cas de la biomasse ligneuse, qui est le « réservoir » forestier le plus important du point de vue de la dynamique du carbone, permet de détailler les différentes étapes de la mise en œuvre de cette conception (figure I-2).

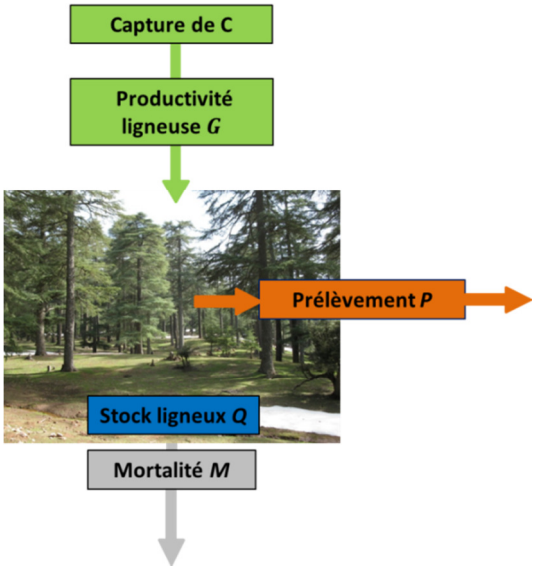


Figure I-2 – Flux et stock pour le compartiment de la biomasse ligneuse

Dans la représentation de la figure I-2, le stock Q désigne, à volonté, le volume ligneux des arbres vifs, la biomasse anhydre ou la masse de carbone associée, étant entendu que, en moyenne statistique, ces grandeurs sont proportionnelles. On a approximativement :

$$1\ \text{m}^3 \text{ de bois} \approx 500 \text{ kg (anhydre)} \approx 250 \text{ kg de carbone}$$

En cohérence, toutes les variables définies ci-après représentent, selon le contexte, des stocks et des flux annuels en termes de volume ligneux, de biomasse sèche ou de contenu carbone.

Le symbole G représente le flux annuel de carbone emprunté à l'atmosphère pour la photosynthèse de biomasse ligneuse et correspond, en termes de volume de bois, à ce que les inventaires forestiers désignent comme la « production biologique » (IFN 2011a) ou encore, en termes de masse de carbone, à la part de la productivité primaire nette (PPN) de l'écosystème considéré affectée à la création de matière ligneuse. Le prélèvement P correspond au contenu carbone des arbres exploités dans l'année et le flux M à celui des arbres morts dans l'année également ; le bois mort est le plus souvent dégradé sur place, avec restitution des éléments le constituant (dont le carbone) à l'atmosphère ou au sol.

Pour la masse de carbone comme pour la biomasse sèche ou le volume de bois, la loi de conservation implique, sur une base annuelle, l'égalité :

$$\text{Accroissement} = \text{Production biologique} - \text{Prélèvement} - \text{Mortalité} \qquad \text{(I-2)}$$

Le bilan des flux au second membre de cette égalité est ici désigné comme accroissement, ce qui est le cas le plus fréquent dans les analyses qui suivent. Il s'agit d'une quantité algébrique, et un accroissement négatif correspond, bien évidemment, à un décroissement.

L'égalité (2) se traduit, pour l'année i, par l'équation :

$$Q_i - Q_{i-1} = (G_i - P_i - M_i) \times \Delta t \qquad (\Delta t = 1 \text{ an}) \qquad \text{(I-3)}$$

Si on envisage l'évolution du système sur un grand nombre d'années, cette équation peut être approchée par une représentation continue dans laquelle on confond la variable discrète « année i » et le temps t, l'intervalle de temps Δt d'une année étant assimilé à l'élément différentiel dt. Les différentes grandeurs Q, G, P et M conservent leur signification de stock et de flux annuels, mais sont des fonctions « lissées » du temps. Il est alors possible de poursuivre analytiquement. On pose ainsi, en correspondance de l'équation (I-3) :

$$dQ/dt = G(t) - P(t) - M(t) \qquad \text{(I-4)}$$

La mortalité M est assurément d'autant plus grande que le stock vif Q est lui-même plus important. En admettant que la relation est de simple proportion, on pose :

$$M = Q/\tau \qquad \text{(I-5)}$$

où le paramètre τ, qui a la dimension d'un temps, peut être interprété comme le temps moyen de renouvellement de la matière ligneuse ou, ce qui revient au même, le temps moyen de résidence du carbone dans le réservoir ou compartiment correspondant. L'équation (I-4) devient :

$$dQ/dt + Q(t)/\tau = G(t) - P(t) \qquad \text{(I-6)}$$

Cette expression est conforme à la formulation-type de la figure I-1 avec $\Phi_e(t) = G(t) - P(t)$. Pourvu que le paramètre τ soit constant, cette équation différentielle classique fait apparaître le compartiment de biomasse forestière comme un système linéaire invariant du premier ordre, soumis à une excitation $[G(t) - P(t)]$ qui est la différence entre la capture de carbone (*i.e.* la productivité biologique ligneuse) et la soustraction de carbone par prélèvement. La réponse du système est la variation du stock $Q(t)$ de carbone « biomasse ligneuse » ou, ce qui revient au même, à un coefficient de conversion près, la biomasse sèche elle-même ou le volume de bois vif.

La solution est la suivante, quelles que soient les fonctions $Gt)$ et $P(t)$ (cf. expression générale I-1) :

$$Q(t) = \left\{Q_0 + \int_0^t [G(t') - P(t')] exp(t'/\tau)\, dt'\right\} exp(-t/\tau) \qquad \text{(I-7)}$$

où Q_0 représente le stock au temps $t = 0$ choisi pour origine.

La confrontation à la réalité de terrain d'un modèle de croissance incorporant le résultat (I-7) doit permettre de s'assurer que l'approximation de linéarité et d'invariance pour la dynamique du carbone forestier n'est pas exagérément simplificatrice.

I-3 Un modèle de croissance pour les peuplements mono-spécifiques équiennes

La validation de modèles de la dynamique du carbone forestier n'est pas aisée, en raison de la rareté de données expérimentales concernant l'évolution des stocks ligneux sous des contraintes diverses, notamment celle de prélèvement, et du fait que les grandeurs observées sont généralement limitées à la partie aérienne des peuplements.

Il existe néanmoins des « tables de production » qui décrivent la croissance de peuplements forestiers, surtout mono-spécifiques équiennes, selon l'essence, le climat et la fertilité des stations (Décourt 1964). Ces tables indiquent, pour des sylvicultures types et en fonction de l'âge, l'évolution de grandeurs telles que le nombre de tiges, la hauteur moyenne et la hauteur dominante, la circonférence moyenne, le volume de bois « fort tige », tant pour les arbres sur pied que ceux qui sont prélevés en éclaircie. Elles donnent en outre l'évolution dans le temps de la production en volume cumulée depuis l'origine du peuplement, production à laquelle le stock de carbone ligneux peut être facilement relié. Ces tables, établies à partir d'un traitement statistique d'observations de terrain, présupposent cependant que les prélèvements se limitent à des éclaircies périodiques de faible intensité n'ayant pas d'impact notable sur la productivité nette non plus que sur la production totale cumulée (Lanier 1994, Skovsgaard 2008).

En se plaçant dans les conditions d'élaboration des tables, on dispose là d'un moyen de mettre à l'épreuve le cadre d'approximation adopté en ce qui concerne la biomasse ligneuse et son contenu carbone. Rappelons que, statistiquement, le volume bois fort tige des arbres, leur volume aérien, leur volume total, leur masse anhydre et leur contenu carbone sont sensiblement proportionnels (Carbofor 2004, Saint André et coll. 2010) et que, par conséquent, l'expression (I-7) du « stock » $Q(t)$ est représentative, à un coefficient multiplicateur près, de l'évolution de chacune de ces grandeurs.

La production totale cumulée $\Pi(t)$ d'un peuplement est la somme du stock en place et de l'intégrale des prélèvements, comptée à partir de l'origine :

$$\Pi(t) = Q(t) + \int_0^t P(t')dt' \qquad \text{(I-8)}$$

soit, compte tenu de l'expression (I-7) de $Q(t)$, avec $Q_0 = 0$ à l'origine du peuplement (plantation) :

$$\Pi(t) = \left[\int_0^t G(t') \exp\left(\frac{t'}{\tau}\right) dt'\right] \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) - \left[\int_0^t P(t') \exp\left(\frac{t'}{\tau}\right) dt'\right] \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) + \int_0^t P(t')dt' \qquad \text{(I-9)}$$

Admettre l'indépendance de la production totale cumulée vis-à-vis de l'intensité des prélèvements d'éclaircie revient à considérer comme négligeable dans l'expression (I-9) la somme algébrique des deux termes dépendant du prélèvement, ce qui présuppose que les éclaircies sont effectivement de faible intensité [$P(t) << G(t)$]. On a donc, dans les conditions d'utilisation des tables :

$$\Pi(t) \approx \left[\int_0^t G(t') exp(t'/\tau)\, dt'\right] exp(-t/\tau) \qquad \text{(I-10)}$$

Par ailleurs, si l'on considère que la photosynthèse convertit l'énergie solaire en énergie chimique contenue dans la biomasse, la production biologique $G(t)$ dépend principalement, pour une essence, une station et un climat donnés, de la surface de capture, c'est-à-dire celle du couvert forestier. Cette surface est nulle à la plantation et augmente avec la croissance des arbres jusqu'à une valeur limite G_∞ lorsque le couvert se ferme. La fonction exponentielle étant solution générale des équations différentielles linéaires du premier ordre à coefficients constants et intervenant donc comme mode propre d'évolution de tout système linéaire invariant du premier ordre, on doit admettre pour $G(t)$, en cohérence avec le cadre d'approximation adopté, une expression de la forme :

$$G(t) = G_\infty\left[1 - exp(-t/\tau_g)\right] \qquad (t \geq 0) \qquad \text{(I-11)}$$

où τ_g est une constante de temps caractéristique.

La formulation (I-11) n'est pas pour autant empirique et peut être avancée sur la base d'une hypothèse de croissance « mono-moléculaire » des peuplements forestiers (Zeide 1993, Paine 2012). L'hypothèse « mono-moléculaire » a son origine en chimie physique où elle permet de décrire l'évolution d'une réaction chimique du premier ordre ; en biologie, et plus particulièrement en écologie, elle postule que le « taux de croissance » est constamment proportionnel à la possibilité de cette croissance. Ainsi, dans la colonisation par une espèce végétale d'un espace nu de surface S_∞, on admet que l'accroissement par unité de temps dS/dt de la surface occupée $S(t)$ est proportionnel à la surface à conquérir. En l'absence de prélèvement (ou en négligeant celui-ci), on aurait donc :

$$dS/dt = k[S_\infty - S(t)] \qquad \text{(I-12)}$$

dont la solution s'écrit, en posant $k = 1/\tau_g$ et avec une surface couverte S_0 nulle ou négligeable à l'origine :

$$S(t) = S_\infty exp\left[1 - exp(-t/\tau_g)\right] \qquad \text{(I-13)}$$

La production biologique d'un peuplement homogène (ou considéré « en moyenne » comme tel) étant proportionnelle à la surface de couvert, l'expression (I-13) implique celle présumée (I-11).

En reportant l'expression (I-11) de la productivité brute annuelle $G(t)$ dans celle (I-10) de la production totale cumulée $\Pi(t)$, on obtient, après intégration, le résultat :

$$\Pi(t) \approx \frac{\tau G_\infty}{\tau - \tau_g}\left\{\tau[1 - \exp(-t/\tau)] - \tau_g\left[1 - \exp\left(-t/\tau_g\right)\right]\right\} \qquad (t > 0) \qquad \text{(I-14)}$$

L'accroissement courant $A(t)$ de la production totale, tel qu'il est donné par les tables, est moyenné sur des intervalles de temps assez réduits (généralement 5 ou 10 ans) pour qu'on puisse l'identifier à la dérivée de l'expression précédente :

$$A(t) = \frac{\tau G_\infty}{\tau - \tau_g}\left[exp(-t/\tau) - exp(-t/\tau_g)\right] \qquad (t > 0) \qquad \text{(I-15)}$$

La figure I-3 donne un exemple de comparaison entre données de tables de production et évolutions prévues par les expressions (I-14) et (I-15) après ajustage des paramètres. Le cas est celui d'un peuplement de Mélèze d'Europe, d'après une table de production anglaise (in Lanier 1994 pp. 324-325). Production totale et accroissement courant sont ici exprimés en volumes « bois fort tige », mais cela n'est pas restrictif car de simples proportionnalités permettent d'accéder au volume aérien (par

le facteur d'expansion de branches) au volume total (par les facteurs d'expansion de branches et de racines), à la masse ligneuse (par la densité du bois) ou encore au contenu carbone qui est de 50 % en masse approximativement (Pettersen 1984). On a décalé l'origine des temps dans les expressions (I-14) et (I-15) d'une valeur $t_0 = 4$ années par rapport à celle des tables pour rendre compte du temps d'installation du peuplement après plantation, pendant lequel la production reste négligeable. Les valeurs de paramètres pour le meilleur accord entre données et valeurs calculées sont $\tau = 34{,}2$ ans, $\tau_g = 13{,}8$ ans et $G_\infty = 29{,}9$ m^3 ha^{-1} an^{-1}.

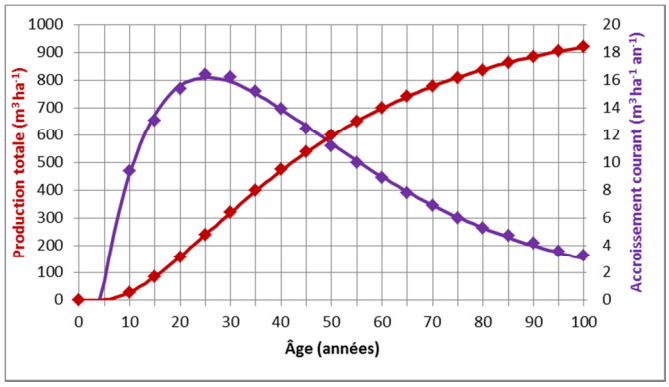


Figure I-3 – Application des formulations (I-14) et (I-15) au cas d'exemple du Mélèze d'Europe
(données de la table : marqueurs de couleur rouge pour le volume produit, violet pour l'accroissement)
Les valeurs de paramètres sont indiquées dans le texte et dans le tableau I-1)

Les figures I-4 et I-5 proposent quelques autres exemples pour des peuplements résineux ou feuillus, à partir des données de tables de production classiques (Epicéa : Jura – classe de productivité 16, *in* Lanier *loc. cit.*, page 274 ; Pin sylvestre : Sologne – classe 2, *ibid.*, page 314 ; Douglas : Ouest du Massif central – classe 1, *ibid.*, page 294. Hêtre : Nord-Est de la France – classe 7 *in* Teissier du Cros 1981 page 590). Les valeurs de paramètres déterminées par régression pour le meilleur ajustement des valeurs calculées par les formules (I-14) et (I-15) avec les données des tables (critère des moindres carrés) sont indiquées dans le tableau I-1. Le coefficient de détermination R^2 est calculé en considérant l'ensemble des données [production cumulée + accroissement courant].

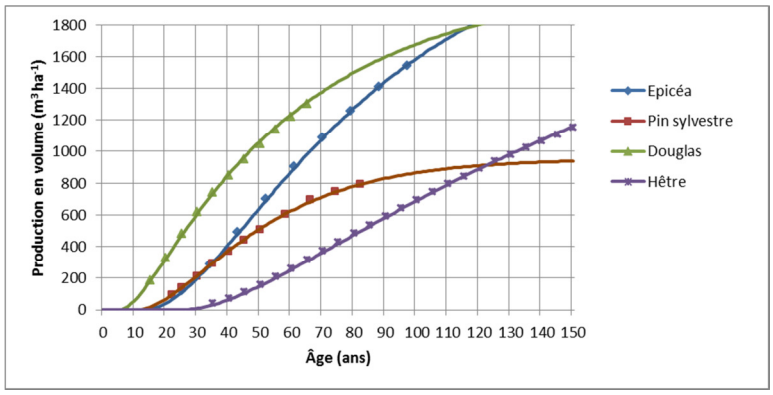


Figure I-4 – Évolution de la production totale en volume « bois fort tige »
pour divers peuplements mono-spécifiques équiennes.
(Les marqueurs représentent les données des tables de production, les courbes sont tracées d'après l'expression (I-14)
avec les valeurs de paramètres indiquées dans le tableau I-1)

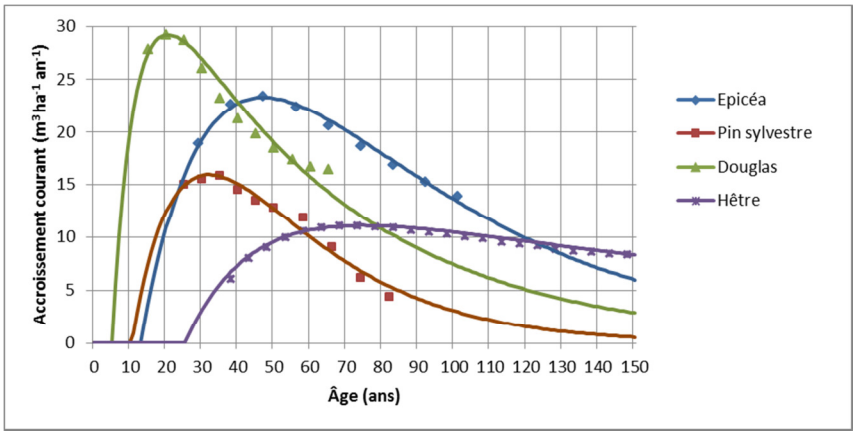


Figure I-5 – Évolution de l'accroissement courant en volume « bois fort tige» pour divers peuplements mono-spécifiques équiennes

(Les marqueurs représentent les données des tables de production, les courbes sont tracées d'après l'expression (I-15) avec les valeurs de paramètres indiquées dans le tableau I-1)

	t_0 (ans)	G_∞ (m^3 ha^{-1} an^{-1})	τ (ans)	τ_g (ans)	R^2
Mélèze	4,38	29,9	34,24	13,79	0,9991
Epicéa	11,70	50,34	45,73	28,49	0,9990
Pin sylvestre	10,55	33,91	28,16	16,40	0,9928
Douglas	5,36	35,29	64,27	4,44	0,9953
Hêtre	25,41	13,5	213,2	15,15	0,9996

Tableau I-1 – Paramètres des évolutions de production totale cumulée et d'accroissement courant représentées sur les figures I-3, I-4 et I-5.

Par le bon accord obtenu entre les expressions théoriques (I-14) et (I-15) et les données des tables de production, il est permis de caractériser un peuplement mono-spécifique équienne par trois paramètres seulement (le retard t_0 n'a d'autre rôle que celui de cadrer l'évolution calculée sur l'échelle des temps, compte tenu du temps d'installation des jeunes arbres après plantation). Ces trois paramètres sont, pour un climat donné, en relation directe avec l'essence et la fertilité de la station. Par exemple, si on se réfère aux six classes de fertilité définies pour l'épicéa dans le nord-est de la France (Décourt 1972, évolutions de production totale représentées sur la figure I-6), le tableau I-2 des paramètres correspondants montre que les valeurs de τ sont peu dispersées, que ce paramètre paraît donc caractéristique de l'essence dans son climat, alors que les valeurs de G_∞ et τ_g sont nettement corrélées à la fertilité des stations.

Epicéa	t_0 (ans)	G_∞ (m^3 ha^{-1} an^{-1})	τ (ans)	τ_g (ans)
Classe 1	7,90	47,7	30,4	7,7
Classe 2	12,4	49,4	27,0	10,4
Classe 3	16,0	44,2	28,5	16,0
Classe 4	18,8	42,5	27,1	18,8
Classe 5	21,6	38,1	27,9	21,6
Classe 6	24,9	30,2	32,9	24,9

Tableau I-2 – Paramètres des évolutions de production totale cumulée représentées sur la figure I-6

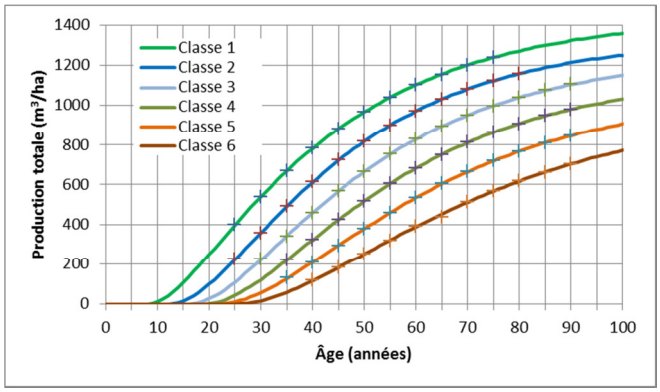


Figure I-6 – Évolution de la production totale en volume « bois fort »
pour des peuplements d'épicéa de diverses classes de fertilité (Décourt 1972)
(Les marqueurs représentent les données des tables de production, les courbes sont tracées d'après l'expression (I-14) avec les valeurs de paramètres indiquées dans le tableau I-2)

La précision avec laquelle les expressions (I-14) et (I-15) représentent l'évolution de peuplements mono-spécifiques équiennes ne doit pas faire illusion. Cette précision pourrait aussi bien être obtenue avec des formules empiriques diverses, comportant trois ou quatre paramètres, abusivement désignées comme « modèles », qui sont souvent utilisées pour représenter la croissance de plantes ou autres organismes [formules de Korf, Richards, Hossfeld ou Weibul, par exemple (Zeide 1993)]. Par contre, les représentations (I-14) et (I-15) s'appuient sur une connaissance au moins élémentaire des mécanismes physiques et biologiques qui président à la dynamique forestière et, validées pour la production et l'accroissement, peuvent être utilisées pour interpréter, expliquer, prévoir, et simuler, au moins qualitativement. Un avantage décisif est la compatibilité avec des développements analytiques dans un cadre d'approximation linéaire.

I-4 Extension aux grands ensembles forestiers

La validation de l'approximation de linéarité et d'invariance dans le cas des peuplements mono-spécifiques équiennes permet-elle son utilisation pour l'analyse de la dynamique du carbone dans des peuplements de structure plus complexe, à l'échelle de massifs forestiers entiers ?

La réponse est évidemment positive lorsque le massif forestier est composé de peuplements mono-spécifiques équiennes. Il suffit de faire la somme des évolutions des stocks ou flux relatives à chacun des peuplements considéré isolément, en tenant compte de la surface qu'il occupe et de la date de sa plantation. Mais il serait intéressant, pour décrire la dynamique du carbone à grande échelle dans des peuplements mélangés ou de grands ensembles forestiers, de pouvoir définir un peuplement homogène équivalent s'inscrivant dans le cadre d'approximation choisi de linéarité et d'invariance.

Cette proposition soulève une difficulté de principe. Quelles que soient l'étendue et la complexité de l'ensemble forestier considéré, l'égalité (I-2) et l'équation (I-4), qui ne font que traduire le principe de conservation, restent vraies et on peut toujours poser :

$$M(t) = Q(t)/\tau^* \qquad \text{(I-16)}$$

mais il n'est alors aucunement assuré que τ^* est une constante indépendante de Q et de t. En effet, même si, pour chacun des peuplements i composants, on pouvait écrire :

$$M_i(t) = Q_i(t)/\tau_i \tag{I-17}$$

avec τ_i constant, le paramètre global τ^* de l'expression (I-16) serait donné par :

$$1/\tau^* = \frac{\sum_i (Q_i/\tau_i)}{\sum_i Q_i} \tag{I-18}$$

et ne serait lui-même constant que si la fonction de répartition des stocks Q_i selon les valeurs de τ_i ne dépendait pas du temps, ce qui est invraisemblable.

Néanmoins, pour des ensembles forestiers diversifiés (essences, stations, âge des peuplements), la proportionnalité de la mortalité en volume au stock sur pied apparaît statistiquement relativement stable dans la durée, hors circonstances exceptionnelles (tempêtes, grands incendies, épiphyties...) Ainsi, pour la forêt française entière, le taux de mortalité en volume, toutes essences confondues, s'établit-il dans une fourchette étroite d'environ 0,3 à 0,4% depuis plusieurs décennies. Le département de la santé des forêts du Ministère de l'agriculture précise : « *Depuis l'origine du réseau de notation, le taux de mortalité nationale est très faible, il est inférieur à 0,5 %. A l'exception des mortalités de 2004, liées aux attaques de scolytes suite à la canicule de 2003, les variations enregistrées chaque année sont négligeables* » (Goudet 2016). Il semble donc possible d'utiliser la même approche que celle qui a été validée dans les cas de peuplements mono-spécifiques équiennes pour de grands ensembles forestiers tant que l'amplitude des contraintes imposées et la durée sur laquelle on envisage l'évolution des stocks et des flux restent compatibles avec des hypothèses de linéarité et d'invariance, ce qui est affaire de bon sens. Ceci revient, de manière pragmatique, à considérer que sur un intervalle de temps limité, fixer τ^* à sa valeur moyenne (ou sa valeur initiale) peut conduire à une représentation dégradée mais encore satisfaisante pour l'objectif poursuivi. Mathématiquement, cette nouvelle approximation se justifie par le fait qu'on a affaire à des sommes d'exponentielles décroissantes (les modes propres des systèmes stables du premier ordre sont exponentiels avec exposant négatif), que ces sommes sont donc à évolution monotone et elles-mêmes d'allure exponentielle. L'approximation est d'autant meilleure que le spectre des constantes de temps composantes est étroit et que la période de temps sur laquelle on l'applique est courte devant la constante de temps dominante.

Les exemples suivants confortent ce point de vue.

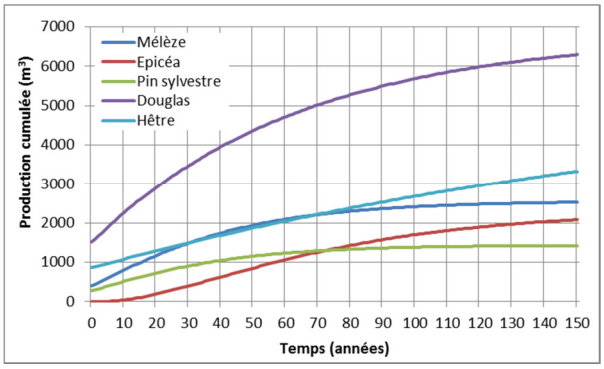
Premier exemple - Les figures I-7 et I-8 représentent l'évolution du volume « bois fort » dans une forêt hypothétique de 10 hectares qui serait constituée de peuplements des essences répertoriées dans le tableau I-1 ; le tableau I-3 indique les âges des peuplements au moment pris pour origine des temps et les surfaces qu'ils occupent (valeurs prises au hasard).

Malgré le petit nombre des peuplements constituants et leurs caractéristiques différentes, l'identification des variations de la production totale cumulée et de l'expression (I-14) est excellente avec des valeurs de paramètres qui sont comparables en ordre de grandeur à ceux des peuplements constituants ($t_0 = -25{,}3$ ans, $G_\infty = 26{,}0$ m^3 ha^{-1} an^{-1}, $\tau = 66{,}0$ ans, $\tau_g = 14{,}3$ ans). Le comportement de l'ensemble forestier reste donc très proche de celui d'un peuplement homogène auquel s'appliquerait avec rigueur l'approximation de linéarité et d'invariance.

	Surface (ha)	Âge (années) à $t = 0$
Mélèze	2,5	20
Epicéa	1	9
Pin sylvestre	1,5	28
Douglas	3	26
Hêtre	2	75

Tableau I-3 – Composition de la forêt dont l'évolution de la production cumulée (volume « bois fort ») est représentée sur les figures I-7 et I-8

(Les caractéristiques des peuplements composants sont indiquées dans le tableau I-1)



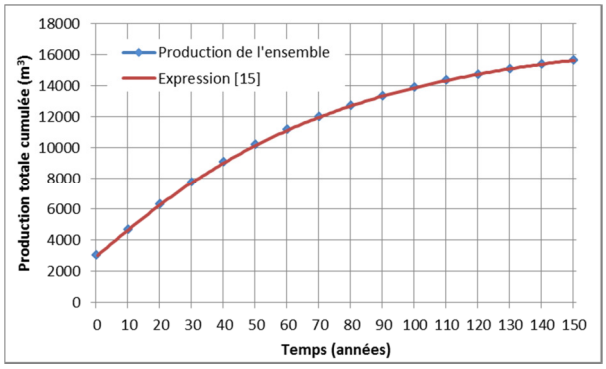


Figure I-7 Figure I-8

Productions cumulées des différents peuplements constituant une forêt hypothétique de 10 hectares (figure I-7) et production cumulée totale (figure I-8)

Deuxième exemple – Le tableau I-4 indique, pour les essences principales de la forêt française, le volume (bois fort tige) des peuplements en place, la production biologique, le prélèvement et la mortalité annuels, d'après l'Inventaire forestier national, données rapportables à l'année 2009 (Maaf & IGN 2016, IGN 2015). Le rapport volume/mortalité indique la valeur de la constante de temps τ représentative du peuplement homogène supposé équivalent à l'ensemble des peuplements de chaque essence.

Dans l'hypothèse d'une production biologique G_i et d'un prélèvement P_i constants, et en admettant que les τ_i sont invariants, le volume sur pied de chaque essence Q_i doit évoluer comme l'indique l'expression suivante, à laquelle se réduit la solution générale (I-7) pour le cas envisagé :

$$Q_i(t) = \tau_i[G_i - P_i] + [Q_{0i} - \tau_i(G_i - P_i)]exp(-t/\tau_i) \qquad \text{(I-19)}$$

La figure I-9 (tracés interrompus) indique, pour l'ensemble des peuplements feuillus d'une part, l'ensemble des peuplements résineux d'autre part, pour l'ensemble de la forêt française enfin, l'évolution présumée du stock sur pied, telle qu'elle résulte de la sommation des $Q_i(t)$:

$$Q(t) = \sum_i\{\tau_i[G_i - P_i] + [Q_{0i} - \tau_i(G_i - P_i)]exp(-t/\tau_i)\} \qquad \text{(I-20)}$$

Mais si on considère chacun de ces ensembles comme invariant, on doit pouvoir poser : $Q_0^* = \sum_i Q_{0i}$, $G^* = \sum_i G_i$, $P^* = \sum_i P_i$, poser également, comme l'indique l'expression (I-18) pour l'année origine :

$$1/\tau^* = \frac{\sum_i (Q_{oi}/\tau_i)}{\sum_i Q_{oi}} \qquad \text{(I-21)}$$

et écrire par conséquent :

$$Q^*(t) = \tau^*[G^* - P^*] + [Q_0^* - \tau^*(G^* - P^*)]exp(-t/\tau^*) \qquad \text{(I-22)}$$

Essence	Volume (10^6 m^3)	Mortalité (10^6 m^3/an)	Cste de temps τ (ans)	Production (10^6 m^3/an)	Prélèvement (10^6 m^3/an)
Chêne pédonculé	299	0,6	498	7,3	3,1
Chêne rouvre	281	0,4	702	6,8	3,7
Hêtre	265	0,3	883	7,5	3,7
Châtaignier	126	1,4	90	5,2	1,7
Charme	105	0,1	1050	4,5	1,8
Chêne pubescent	104	0,3	347	2,6	0,5
Frêne	99	0,2	495	3,7	0,9
Peuplier	32	0,1	320	2,8	1,6
Autres feuillus	313	1,8	174	14,4	3,2
Total feuillus	1624	5,2	312	54,8	20,2
Sapin pectiné	190	0,3	633	7,2	3,2
Epicéa commun	188	0,8	235	7,7	5
Pin sylvestre	143	0,8	179	3,9	1,8
Pin maritime	132	0,5	264	7,1	6,8
Douglas	107	0,4	268	5,9	2,3
Autres résineux	133	0,5	266	4,8	2,1
Total résineux	893	3,3	270	36,6	21,2
TOTAL	2517	8,5	296	91,4	41,4

Volumes bois fort tige sur écorce

Tableau I-4 – Stocks et flux ligneux dans la forêt française métropolitaine
(Données de l'inventaire forestier national rapportables à l'année 2009)

Avec les valeurs de paramètres données dans le tableau I-4, l'expression (I-22) qui, par construction, donne le même résultat que (I-20) pour l'année origine, reste en très bon accord avec cette dernière sur un intervalle de temps considérable (cf. figure I-9, tracés continus), pour l'ensemble des feuillus d'une part (avec $\tau^* = 312$ ans), pour l'ensemble des résineux d'autre part (avec $\tau^* = 270$ ans) et aussi pour la réunion de ces deux ensembles (avec $\tau^* = 296$ ans), ce qui permet en pratique et malgré la difficulté de principe signalée plus haut, de considérer chacun de ces ensembles et aussi la forêt française entière comme un réservoir ou compartiment de matière ligneuse (et de carbone) caractérisé par une constante de temps unique et invariable.

En raisonnant par récurrence, on est donc amené à postuler que tout ensemble forestier, quelle que soit sa dimension et sa complexité entre le peuplement mono-spécifique équienne et la forêt française toute entière peut être représenté approximativement, pour ce qui est de la dynamique du volume ligneux, de sa masse et de son contenu carbone, par un modèle simple linéaire du premier ordre à paramètre constant.

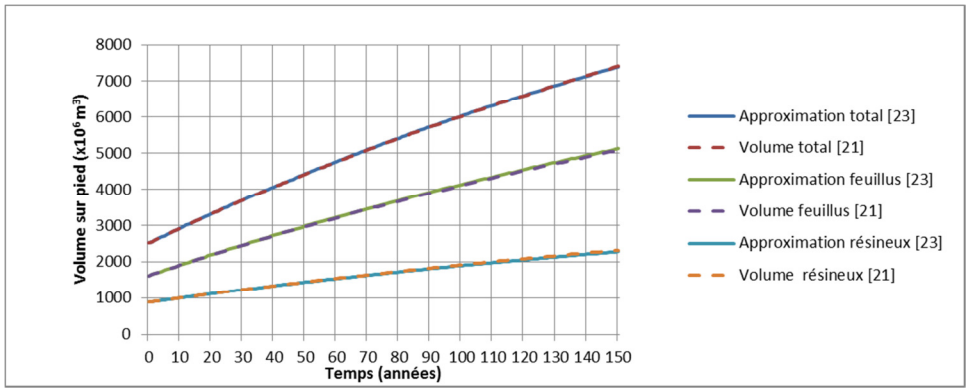


Figure I-9 – Comparaison, pour la forêt française, des évolutions présumées des volumes bois fort tige (courbes tiretées) aux évolutions prévues selon une approximation linéaire invariante du premier ordre (courbes continues).

I-5 Conclusion

Quelles que soient l'étendue et la complexité du massif forestier étudié, le compartiment de biomasse ligneuse peut être considéré, en première analyse, comme un système linéaire invariant du premier ordre, malgré l'objection de principe discutée au paragraphe I-4. En est-il de même pour les autres réservoirs de carbone, ceux de nécromasse notamment ? Les données d'observation sont insuffisantes pour permettre de l'affirmer dans tous les cas, mais tout réservoir de carbone se plie au principe de conservation, et la facilité de raisonnement que permettent les approximations de linéarité et d'invariance, bien éprouvées dans de nombreux domaines de la physique , incite à passer outre à une validation rigoureuse *a priori* qui est rarement possible dans le contexte forestier. C'est d'ailleurs la position pragmatique à laquelle se rallient les auteurs lorsqu'ils font appel aux notions de temps de résidence, de renouvellement, de transit ou de durée de vie à propos du carbone dans le bois mort, les racines, la litière, le sol ou les produits bois (Garrett et coll. 2012, Russell et coll. 2014, Brunner et coll. 2013, Zhang et coll. 2010, Pingoud et coll. 2001, ...). Les modèles simples de dynamique du carbone proposés dans la suite du document paraissent alors d'autant mieux acceptables qu'ils s'articulent autour d'un compartiment principal de biomasse ligneuse pour lequel la représentation linéaire invariante est effectivement robuste. Ceci ne veut pas dire que toute hypothèse de variation des paramètres dans le temps, selon l'évolution du climat par exemple, est exclue a priori ; il est toujours possible en effet, de segmenter l'axe des temps t en plages suffisamment courtes pour justifier l'approximation d'invariance sur chacune d'elles, et d'ajuster les valeurs de paramètres lorsqu'on passe de l'une à l'autre en préservant la continuité des stocks et flux.

***

DEUXIÈME PARTIE

DYNAMIQUE DU CARBONE FORESTIER ET FORMATION DE l'EMPREINTE CARBONE

Comme conséquence du principe de conservation, la variation du stock de carbone dans la forêt et dans les produits bois issus de la récolte est la mesure de l'échange de carbone entre le système forêt-bois et l'atmosphère. Si, sur un intervalle de temps donné, cette variation est nulle, l'échange est, de même, globalement nul sur cet intervalle de temps. C'est le cas, par exemple, d'une forêt gérée à stock de bois sur pied constant et dont la production ligneuse serait utilisée comme combustible : cette forêt n'aurait aucune influence sur l'effet de serre. De là, le diagnostic hâtif d'une « neutralité carbone » des usages énergétiques du bois (et de la biomasse en général), diagnostic auquel les tenants des bioénergies s'arrêtent le plus souvent. Cependant, le régime permanent statique, qui est la condition nécessaire et suffisante d'une « neutralité carbone » continue, est rarement une réalité de terrain, et n'est pas souhaitable lorsqu'il s'agit de lutter directement contre le changement climatique. C'est bien la croissance du stock de carbone, en forêt et dans les produits bois qu'il est préférable de rechercher, sans négliger pour autant les éventuels effets de substitution du bois récolté à d'autres sources d'énergie ou d'autres matériaux, effets qu'il convient d'apprécier cas par cas.

L'objet de cette deuxième partie du document est de mettre en évidence, au-delà de l'assertion simpliste de neutralité carbone, les mécanismes par lesquels se forme l'empreinte carbone de la forêt et de l'utilisation de son bois. La figure II-1 propose, pour ce faire, un support d'analyse. Ce modèle complète celui de la figure I-2 qui est restreint au seul contenu carbone des arbres vifs, en lui associant un compartiment de « nécromasse » (bois mort et racines mortes essentiellement). Ces deux éléments suffisent pour mettre en lumière les traits marquants de la dynamique du carbone forestier. Aussi, abstraction est faite, pour simplifier, d'un troisième compartiment, celui du carbone stocké, sous forme organique ou minérale, dans la litière et dans le sol, dont les contenus sont considérés ici, par défaut, comme invariables. La contribution de ce compartiment sera effectivement prise en compte dans un modèle plus complet utilisé dans la quatrième partie du document pour accéder à des ordres de grandeur. On fait également abstraction, pour rester simple, des stocks et flux de carbone attachés à de la biomasse non ligneuse ainsi que des émissions annexes, « amont » et « grises », qui peuvent être comptabilisées à part (cf. troisième partie).

II-1 Modèle simplifié à deux compartiments forestiers

Le périmètre forestier considéré est quelconque : il peut s'agir d'une parcelle, mono-spécifique ou non, d'un massif constitué de peuplements diversifiés en essences et en âges, de plusieurs massifs, ou de la forêt française toute entière.

Dans le schéma de la figure II-1, le carbone forestier est réparti entre deux compartiments principaux, celui de la biomasse ligneuse des arbres vifs d'une part (stock Q), celui de la nécromasse d'autre part (stock N). Le compartiment « biomasse » est alimenté à partir de carbone puisé dans l'atmosphère (capture G correspondant à la production biologique annuelle), et se vide par ailleurs par biodégradation (mortalité M) et par exploitation (prélèvement annuel P). La nécromasse est celle du bois mort sur pied ou au sol, auquel il convient de joindre les pertes d'exploitation (fraction α du prélèvement); ces pertes comprennent principalement des branchages et débris ligneux laissés sur coupe et les racines mortes ou mourantes des arbres exploités. Cette nécromasse se décompose et renvoie du carbone dans l'atmosphère (émission E_1).

De la récolte R, une fraction est brûlée de manière quasi-immédiate pour répondre à des besoins de chaleur ; le reste alimente les filières de fabrication des produits bois, les déchets de fabrication pouvant être utilisés pour produire de l'énergie. Les produits bois ont une durée de vie limitée, se dégradent ou sont frappés d'obsolescence et, en se décomposant ou en servant de combustible, finissent par rendre leur carbone à l'atmosphère. L'émission E_2 cumule les émissions issues du bois récolté. On fait abstraction ici des émissions « amont » liées aux actions de sylviculture et à toutes les opérations qui vont de l'abattage des arbres à la mise à disposition du combustible ou du matériau ainsi que des émissions « grises » des processus de fabrication des produits bois ; ces émissions peuvent être comptées à part (cf. troisième et quatrième parties du document).

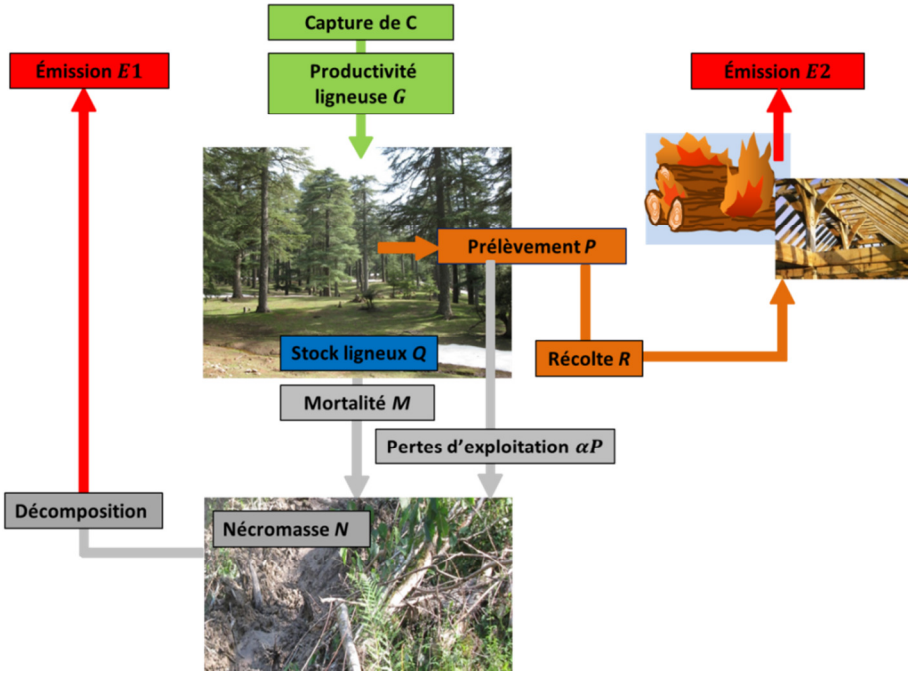


Figure II-1 – Représentation simplifiée des stocks et flux de carbone forestier

Toutes les grandeurs qu'on vient de définir représentent des stocks ou des flux de carbone et on admet que, sur une base annuelle, l'évolution du stock dans chacun des compartiments et la relation entre les flux entrant et sortant répondent à la formulation linéaire invariante de la figure I-1.

Quelles que soient les fonctions $G(t)$ et $P(t)$, en notant τ et τ_d les constantes de temps caractéristiques respectives des compartiments de biomasse et de nécromasse, la solution générale (I-1) conduit, en cascade, aux résultats suivants :

- Stock de carbone ligneux $Q(t)$

$$Q(t) = \left\{Q_0 + \int_0^t [G(t') - P(t')] exp(t'/\tau)\, dt'\right\} exp(-t/\tau) \qquad \text{(II-1)}$$

où Q_0 représente le stock au temps $t = 0$ choisi pour origine.

- Flux de mortalité $M(t)$

$$M(t) = Q(t)/\tau \qquad \text{(II-2)}$$

- Stock de carbone « nécromasse » $N(t)$

$$N(t) = \left\{N_0 + \int_0^t [\alpha P(t') + M(t')] exp(t'/\tau_d)\, dt'\right\} exp(-t/\tau_d) \qquad \text{(II-3)}$$

où N_0 représente le stock initial.

- Flux d'émission $E_1(t)$ (nécromasse)

$$E_1(t) = N(t)/\tau_d \qquad \text{(II-4)}$$

- Récolte $R(t)$

$$R(t) = (1 - \alpha)P(t) \qquad \text{(II-5)}$$

Le flux d'émission $E_2(t)$ dépend de l'utilisation des bois récoltés. Son évaluation est traitée avec détail dans la troisième partie du document. Pour aller à l'essentiel dans l'analyse de la dynamique du carbone forestier, on admettra ici, sauf spécification contraire, que l'ensemble de la récolte est voué à combustion ou décomposition dans un laps de temps réduit après prélèvement et donc que, en termes de flux de carbone :

$$E_2(t) \approx R(t) \qquad \text{(II-6)}$$

Le flux de carbone capturé dans l'atmosphère étant représenté par $G(t)$, la capture nette est la différence $[G(t) - E_1(t) - E_2(t)]$ et l'empreinte carbone Emp de la forêt et de l'utilisation de son bois sur un intervalle de temps (t_1, t_2) est donnée par l'expression:

$$Emp(t_1, t_2) = \int_{t_1}^{t_2} [G(t) - E_1(t) - E_2(t)] dt \qquad \text{(II-7)}$$

La convention de signe implicite dans cette formulation est : capture (+), émission (-). Cette convention est inverse de celle généralement retenue dans la littérature mais cohérente avec le rôle central que jouent les variations de stock (si la capture est supérieure à l'émission, le stock de carbone s'accroît) et en accord avec le sens commun qui voit dans une empreinte « positive » un facteur d'atténuation du changement climatique. Par ailleurs, le principe de conservation implique,

abstraction faite des émissions annexes, que l'empreinte carbone relative au périmètre forestier considéré et à l'utilisation du bois récolté est strictement égale à la variation, sur l'intervalle de temps (t_1, t_2), du stock total de carbone, en forêt et, hors forêt, dans les produits bois.

Deux cas d'école, prélèvement continu constant, d'une part, prélèvement instantané (impulsionnel), d'autre part, permettent de mettre en évidence les mécanismes des échanges de carbone entre la forêt, l'utilisation de son bois et l'atmosphère.

II-2 Prélèvement continu constant

Dans ce premier scénario, la production biologique (i.e. la capture de carbone dans l'atmosphère) est admise constante d'année en année, $G(t) = G_0$ (couvert forestier fermé, cf. section I-3) ; le prélèvement est lui-même supposé constant, $P(t) = P_0$, ainsi que la récolte $R(t) = R_0 = (1-\alpha)P_0$. Les conditions initiales sur les stocks (Q_0, N_0) sont *a priori* quelconques.

II-2-1 Variation du stock $Q(t)$ (Compartiment de biomasse ligneuse)

L'expression générale (II-1) est précisée sous la forme :

$$Q(t) = Q_0 exp(-t/\tau) + \tau(G_0 - P_0)[1 - exp(-t/\tau)] \qquad (t > 0) \qquad \text{(II-8)}$$

Partant d'une valeur initiale quelconque, le stock de carbone $Q(t)$ croît (a) ou décroît (b) selon une loi exponentielle de constante de temps τ et, pour $t \gg \tau$, tend vers la valeur asymptotique $Q_\infty = \tau(G_0 - P_0)$ correspondant à un équilibre strict entre flux de carbone capturé (G_0), d'une part, la somme du flux prélevé (P_0) et du flux de mortalité (Q_∞/τ), d'autre part (Figure II-2).

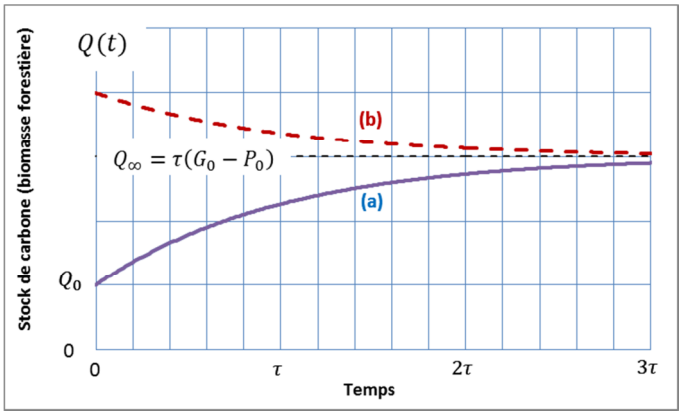


Figure II-2 – Evolutions-types du stock de carbone « biomasse » sous prélèvement constant

Il convient de souligner qu'en régime permanent $(t \to \infty)$, avec $Q_\infty = \tau(G_0 - P_0)$, le stock de carbone (et le volume ligneux sur pied) d'une forêt exploitée $(P_0 \neq 0)$ est inférieur à celui qu'on observerait si elle ne l'était pas. On voit aussi que si $P_0 = G_0$, la forêt finit par disparaître : le prélèvement annuel doit rester nettement inférieur à la production biologique brute G_0. Plus précisément, pour accroître le stock $Q(t)$ ou au moins le conserver, le prélèvement P_0 doit être strictement inférieur à la production biologique nette $[G_0 - Q_0/\tau]$. Si $P_0 = G_0/2$, par exemple, le stock sur pied sera réduit de moitié, *in fine*, par rapport à ce qu'on observerait si la forêt n'était pas

exploitée. Ces conclusions s'entendent sous hypothèse d'indépendance de la production biologique vis-à-vis du prélèvement. En réalité, si le prélèvement affecte le couvert forestier, la production s'en trouve affaiblie ($G < G_0$) et les conclusions précédentes sont aggravées.

Un débat récurrent, en France, porte sur le taux moyen de prélèvement dans les forêts de production, actuellement de l'ordre de 50% et souvent jugé insuffisant. Ce taux est défini comme le rapport du prélèvement à la production biologique nette. Dans plusieurs études prospectives, il est proposé de porter ce taux à 75 % ou même à 90 % sans que soient sérieusement envisagées les conséquences sur la capacité de stockage de carbone par la biomasse ligneuse. La notion de taux de prélèvement doit être utilisée avec prudence. Si elle sert à chiffrer un niveau de prélèvement qui doit être longtemps maintenu, il convient de remarquer que le taux ne reste pas fixe, évoluant vers 100 % à l'approche du régime permanent. Par ailleurs, toujours à niveau de prélèvement constant, le stockage $Q(t) - Q_0$ du carbone dans la biomasse ligneuse est fortement dépendant du taux de prélèvement initial $[P_0/(G_0 - Q_0/\tau)]$. Par exemple, les taux initiaux de 50 %, 75 % et 90 % impliquent respectivement des réductions du stockage $Q(t) - Q_0$ à 50 %, 25 % et 10 % de celui qu'on observerait en l'absence de prélèvement, quel que soit t.

II-2-2 Variation du stock $N(t)$ (Compartiment de nécromasse)

La solution générale (II-3) est précisée sous la forme :

$$N(t) = N_0 exp(-t/\tau_d) + \tau_d \alpha P_0[1 - exp(-t/\tau_d)] + \frac{Q_0 \tau_d}{\tau - \tau_d}[exp(-t/\tau) - exp(-t/\tau_d)] + \frac{\tau_d}{\tau - \tau_d}(G_0 - P_0)\{\tau[1 - exp(-t/\tau)] - \tau_d[1 - exp(-t/\tau_d)]\} \quad \text{(II-9)}$$

L'évolution du stock de carbone dans le compartiment « nécromasse » qui est alimenté par le flux constant des pertes d'exploitation (αP_0), d'une part, par le flux variable lié à la mortalité ($Q(t)/\tau$), d'autre part, associe deux variations exponentielles de constantes de temps τ et τ_d qui sont, le plus souvent, assez différentes avec $\tau_d < \tau$. Aussi, pour les temps supérieurs à quelques unités de τ_d, seule joue en pratique la variation de constante de temps τ.

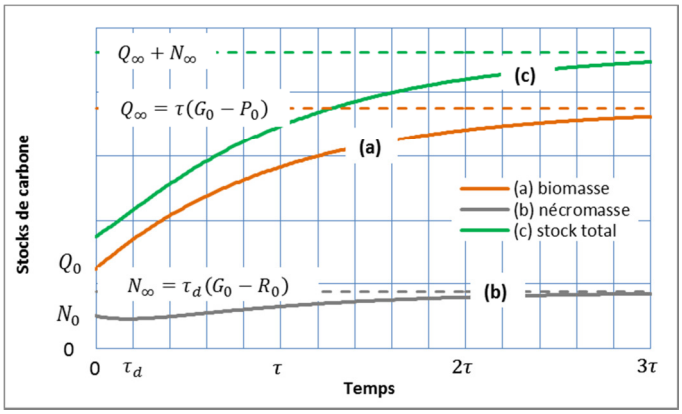


Figure II-3 Évolution des stocks de carbone « biomasse » et « nécromasse »

La figure II-3 donne un exemple pour $\tau_d = \tau/5$ et $N_0 = Q_0/2{,}5$. Dans tous les cas, pour les temps longs devant la constante de temps τ, le stock de carbone « nécromasse » tend vers la valeur asymptotique $N_\infty = \tau_d[G_0 - (1-\alpha)P_0] = \tau_d[G_0 - R_0]$. Le stock de carbone « biomasse » tendant, de son côté, vers $Q_\infty = \tau(G_0 - P_0)$, le stock total $Q(t) + N(t)$ varie de $Q_0 + N_0$ initialement à $[(\tau + \tau_d)(G_0 - P_0) + \tau_d \alpha P_0]$ asymptotiquement.

La pente de la variation de $N(t)$ est, ici, initialement négative. Ceci est dû au choix d'une condition initiale N_0 qui, résultat d'une évolution antérieure, est supérieure à celle correspondant au prélèvement P_0 imposé à partir de $t = 0$.

II-2-3 Émissions, capture et capture nette

L'émission $E_1(t) = N(t)/\tau_d$ issue du compartiment « nécromasse » varie de N_0/τ_d initialement à la valeur asymptotique $[G_0 - R_0]$. L'émission $E_2(t)$ correspond au contenu carbone de la récolte annuelle $R_0 = (1-\alpha)P_0$ si celle-ci est destinée à servir exclusivement de combustible, mais peut varier transitoirement si tout ou partie du bois récolté entre dans la fabrication de produits plus ou moins durables. En tout cas cependant, l'émission $E_2(t)$ tend asymptotiquement, pour $t \to \infty$, vers la même valeur R_0. En effet, en régime permanent à récolte annuelle constante, le stock de carbone dans les produits bois reste lui-même constant, les produits bois nouvellement fabriqués ne faisant que remplacer ceux qui parviennent au terme de leur usage, se décomposent ou sont brûlés. Les émissions « amont » et « grises » étant mises à part, l'émission totale a donc pour valeur initiale $R_0 + N_0/\tau_d$ lorsque le bois récolté sert de combustible, et a pour valeur asymptotique G_0 dans tous les cas d'utilisation de la récolte (Figure II-4).

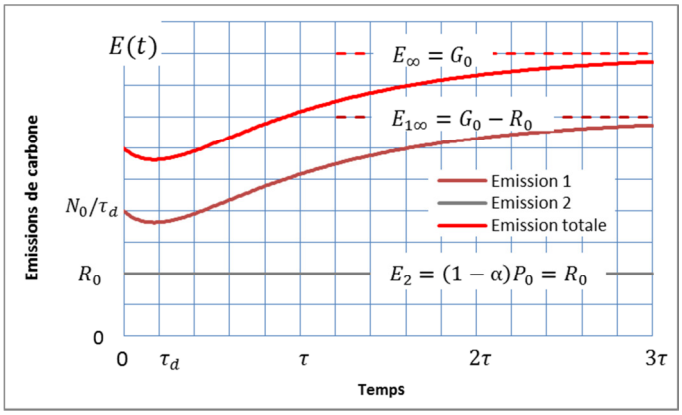


Figure II-4 – Évolution des émissions dans l'hypothèse de combustion de la récolte

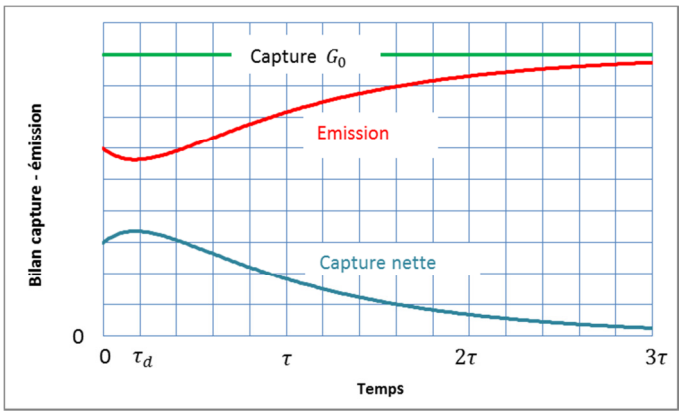


Figure II-5 – Évolution de l'émission totale et de la capture nette dans l'hypothèse de combustion de la récolte

Il en résulte que la capture nette de carbone dans l'atmosphère, différence entre le flux effectivement capturé par photosynthèse et celui rendu à l'atmosphère par combustion ou décomposition, finit par s'annuler en régime permanent (Figure II-5). On a en effet, pour $t \to \infty$:

$$E_1 + E_2 = G_0 \qquad \text{(II-10)}$$

« Neutralité carbone », donc ? Oui, dans le sens où la capture de carbone par photosynthèse égale l'émission par combustion ou décomposition du bois, et uniquement en régime permanent statique. Cette « neutralité » est mise en défaut pendant tout le régime transitoire, et celui-ci couvre une période de temps qui se compte en unités de τ soit, en pratique, de plusieurs décennies à plusieurs siècles.

Les partisans du bois énergie considèrent que cette « neutralité » est effective dans n'importe quelle condition compatible avec « une gestion durable des forêts » et affirment en conséquence que le remplacement des combustibles fossiles par du bois permet d'afficher une empreinte carbone nulle pour la production de chaleur, émissions « amont » mises à part (cf. par exemple, en vrac : ADEME & MEEDM 2009, AF&PA 2015, WBCSD 2015, FC 2015...). Or, la « neutralité » veut dire « égalité capture-émission », absolument pas « absence d'émission lorsqu'on brûle du bois », et n'est réalisée que dans le cas particulier d'un régime permanent statique, qui peut être celui d'une gestion des forêts à volume sur pied constant, mais qu'il est abusif d'ériger en cas général. De fait, nul ne peut contester de bonne foi que le bois que l'on brûle ou qui se décompose émet, sous forme de dioxyde, le carbone qu'il contient (50 % de la masse sèche). Certes, on peut mettre en avant que la capture de carbone peut compenser l'émission. Mais postuler un lien d'égalité entre capture par la forêt (G) et émission par combustion ou décomposition du bois (E_2) alors que ces deux variables sont indépendantes, est une erreur flagrante.

II-2-4 Empreinte carbone

L'empreinte carbone définie par l'expression (II-7) est l'intégrale de la capture nette (cf. figure II-5) et correspond à la variation du stock total de carbone (cf. figure II-3). Cette empreinte varie donc dans le temps, de zéro à l'origine à une valeur asymptotique qui, pour une utilisation du bois récolté comme combustible, s'écrit :

$$Emp(0,\infty) = (\tau + \tau_d)(G_0 - P_0) + \alpha\tau_d P_0 - (Q_0 + N_0) \qquad \text{(II-11)}$$

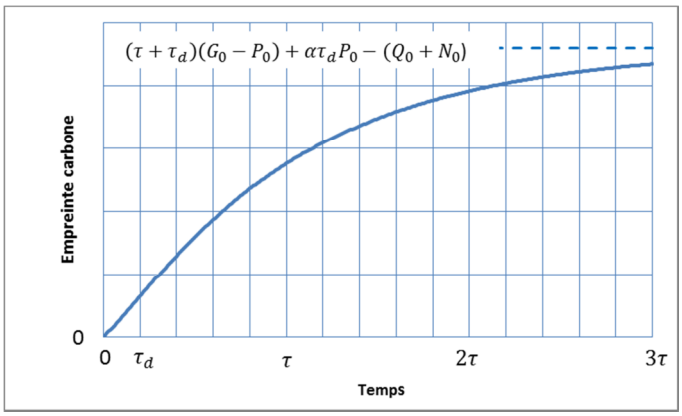


Figure II-6 – Évolution de l'empreinte carbone dans l'hypothèse de combustion de l'entière récolte

(L'échelle des ordonnées est dilatée d'un facteur x1,6 par rapport à celle de la figure II-3)

Positive dans le cas présent ($Q_0 < Q_\infty$), cette empreinte traduit une accumulation de carbone dans la forêt aux dépens de l'atmosphère (Figure II-6). Elle correspond ici, à tout instant t, à la somme des stocks de carbone accumulés dans la biomasse ligneuse et dans la nécromasse.

L'empreinte carbone, dans l'entendement courant, évoque une masse de carbone libérée (ou capturée), dûment chiffrée. Pourtant, dans la plupart des cas, l'empreinte carbone d'un objet, d'une action ou d'une activité se forme dans le temps, de manière progressive, et ce n'est que lorsque l'intervalle de temps à considérer est court devant les constantes de temps du système climatique que l'on peut se contenter d'un chiffre global. Dans la figure II-6, l'échelle des temps est graduée avec la constante de temps τ pour unité ; celle-ci s'évalue en dizaines ou en centaines d'années (cf. section I-4) et l'évolution des stocks, donc celle de l'empreinte carbone, ne peut que se poursuivre bien au-delà des échéances climatiques de la fin de ce siècle. La linéarité et l'invariance (au moins approximatives) du système forêt-bois permet cependant d'assurer que l'empreinte carbone à tout instant t dépend du prélèvement de la même manière que l'empreinte carbone complètement formée.

II-3 Prélèvement ponctuel, instantané

Dans le cadre d'approximation adopté, l'ensemble des propriétés des systèmes linéaires invariants s'applique au « système forestier », notamment la propriété de superposition des solutions. En vertu de celle-ci, pour un couple entrée-sortie donné, il suffit de connaître la réponse à des signaux-test simples pour être en mesure de déterminer le comportement du système vis-à-vis de n'importe quelle excitation dès lors qu'on sait représenter cette dernière par une somme (ou une intégrale) de tels signaux-tests. Le plus simple de ces signaux est l'impulsion-unité $\delta(t)$: la réponse $r(t)$ à une excitation quelconque $e(t)$ s'obtient alors par une intégrale de convolution portant sur la réponse impulsionnelle $h(t)$:

$$r(t) = \int_0^t e(t')h(t-t')dt' = \int_0^t e(t-t')h(t')dt' \qquad \text{(II-12)}$$

En conséquence, la réponse impulsionnelle d'un système linéaire invariant caractérise entièrement le système en ce qui concerne la relation entrée-sortie (ou excitation-réponse).

L'analyse de la réponse impulsionnelle du système forestier permet donc d'approfondir et de généraliser les premières conclusions tirées de l'étude du cas d'école précédent (prélèvement continu constant).

Pour rester simple, on imagine, *dans un premier temps*, que la forêt est en situation d'équilibre sous les contraintes permanentes constantes : $G = G_0, P = P_0$ (cf. section II-2 précédente), et qu'on effectue en un temps court un prélèvement supplémentaire d'arbres vifs de contenu carbone q_p. On suppose aussi que le flux de carbone capturé n'est pas modifié (production inchangée), conserve donc sa valeur G_0, et que le bois récolté en supplément sert de combustible.

II-3-1 Variation des stocks de carbone

Dans ces conditions, l'évolution du stock de carbone « biomasse » s'écrit :

$$Q(t) = \tau(G_0 - P_0) - q_p exp(-t/\tau) \quad \text{pour} \quad t \geq 0 \qquad \text{(II-13)}$$

La variation de ce stock par rapport à sa valeur initiale $Q_0 = \tau(G_0 - P_0)$ est représentée sur la figure II-7 (a). Après une réduction brusque correspondant au prélèvement, le retour à l'équilibre s'effectue exponentiellement avec la constante de temps τ. En effet, à production biologique inchangée, la réduction du stock entraîne celle de la mortalité, ce qui implique d'après le bilan (I-2) une variation positive de l'accroissement, en volume sur pied et en masse de carbone.

Le stock de carbone « nécromasse » s'écrit, de son côté, pour $t \geq 0$:

$$N(t) = \tau_d[G_0 - R_0] + \alpha q_p exp(-t/\tau_d) - \frac{q_p \tau_d}{\tau - \tau_d}[exp(-t/\tau) - exp(-t/\tau_d)] \qquad \text{(II-14)}$$

La variation de ce stock par rapport à sa valeur initiale $N_0 = \tau_d[G_0 - R_0]$ est représentée sur la même figure II-7 (b). La part du prélèvement correspondant aux pertes d'exploitation étant transférée de manière immédiate au compartiment de nécromasse, ce compartiment voit donc d'abord son stock de carbone augmenter de la quantité αq_p. L'évolution ultérieure du stock « nécromasse » résulte, d'une part, de la décomposition progressive de ces pertes d'exploitation (constante de temps τ_d), d'autre part, de la diminution des apports de carbone liés à la mortalité qui s'est trouvée réduite en même temps que le stock « biomasse »; ces apports se rétablissent néanmoins en même temps que $Q(t)$ avec la constante de temps τ, permettant ainsi, sous réserve d'une production biologique inchangée, le retour à la situation initiale. Les représentations graphiques de la figure II-7 sont établies en supposant τ_d nettement inférieur à τ, ce qui est le plus souvent le cas.

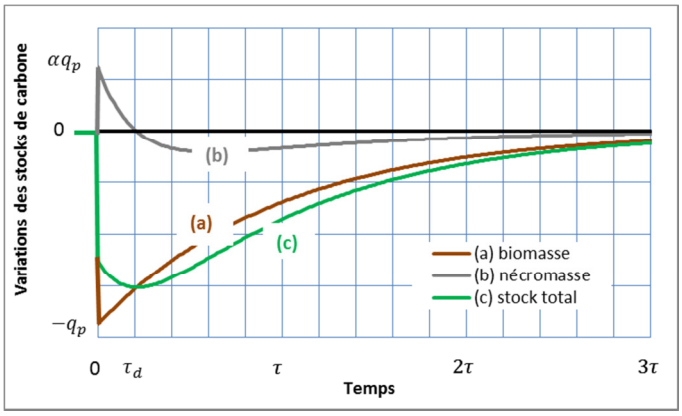


Figure II-7 – Variations des stocks consécutives à un prélèvement instantané

Si la récolte supplémentaire ponctuelle est utilisée de manière immédiate pour l'énergie, la variation du stock total de carbone dans le système est simplement la somme algébrique des deux variations (a) et (b) précédentes [figure II-7 (c)] et, entre l'instant origine et tout instant t, s'identifie à celle de l'empreinte carbone, c'est-à-dire à la masse de carbone échangée avec l'atmosphère.

II-3-2 Bilan capture-émission et empreinte carbone

L'émission $E_1(t)$ est donnée par la relation (II-4) à partir de l'expression (II-14) de $N(t)$:

$$E_1(t) = G_0 - R_0 + \frac{\alpha q_p}{\tau_d} exp(-t/\tau_d) - \frac{q_p}{\tau - \tau_d}[exp(-t/\tau) - exp(-t/\tau_d)] \qquad \text{(II-15)}$$

De son côté, l'émission $E_2(t)$ est augmentée du contenu carbone de la récolte supplémentaire soit $(1-\alpha)q_p\delta(t)$ où $\delta(t)$ est le symbole mathématique de l'impulsion-unité, celle-ci permettant de représenter l'instantanéité de cette récolte et de sa combustion :

$$E_2(t) = R_0 + (1-\alpha)q_p\delta(t) \tag{II-16}$$

Le bilan capture-émission s'écrit donc, pour une capture constante $G = G_0$:

$$G_0 - E_1(t) - E_2(t) = -(1-\alpha)q_p\delta(t) - \frac{\alpha q_p}{\tau_d}exp(-t/\tau_d) + \frac{q_p}{\tau-\tau_d}[exp(-t/\tau) - exp(-t/\tau_d)] \tag{II-17}$$

La figure II-8 montre l'évolution de ce bilan : le prélèvement ponctuel pour l'énergie à partir d'une situation d'équilibre fait de la forêt et de l'utilisation de son bois une source de carbone vis-à-vis de l'atmosphère, dans un premier temps (émission de combustion de la récolte, décomposition des pertes d'exploitation), un puits ensuite (recouvrement du stock de carbone initial dans les compartiments de biomasse et de nécromasse). Pour τ_d nettement inférieur à τ, le retour à l'équilibre s'achève exponentiellement avec τ pour constante de temps principale .

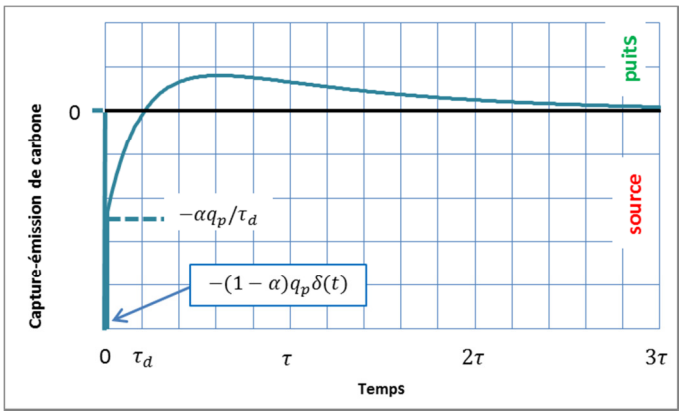


Figure II-8 – Bilan capture-émission du prélèvement instantané

L'empreinte carbone définie par l'expression (II-7), comptée à partir de l'instant du prélèvement choisi pour origine des temps ($t_1 = 0, t_2 = t$), intègre le bilan capture-émission précédent. Représentée sur la figure II-9, cette empreinte s'identifie à la variation du stock total de carbone dans le système [cf. courbe (c) dans la figure II-7] et a pour expression :

$$Emp(0,t) = -(1-\alpha)q_p - \alpha q_p[1 - exp(-t/\tau_d)] + \frac{q_p}{\tau-\tau_d}\{\tau[1 - exp(-t/\tau)] - \tau_d[1 - exp(-t/\tau_d)]\} \tag{II-18}$$

Cette empreinte est ici négative, correspondant à une émission nette de carbone depuis l'origine, quel que soit l'instant t considéré. Aux temps « longs », cependant, le résultat semble donner raison aux tenants de la « neutralité carbone » du bois énergie : l'empreinte carbone tend vers zéro comme tend vers zéro la valeur du puits de carbone dans la figure II-8. Les conséquences du prélèvement ponctuel finissent donc par s'effacer. En bref, le peuplement forestier tend à se reconstituer identique à ce qu'il était avant prélèvement, sous réserve, naturellement, que les conditions soient

inchangées, notamment en ce qui concerne la production biologique. Vue comme un système, la forêt retrouve naturellement son équilibre, comme le fait tout système stable, au terme d'un régime transitoire associant les constantes de temps caractéristiques des différents compartiments de biomasse et de nécromasse. Le mécanisme stabilisateur est le flux de mortalité, proportionnel au volume de bois sur pied et à la masse de carbone correspondante : une réduction du stock « biomasse » s'accompagne d'une diminution du flux de mortalité en sorte qu'à production inchangée, l'accroissement varie positivement, ce qui tend à compenser la réduction de ce stock, comme l'indique le bilan (I-2).

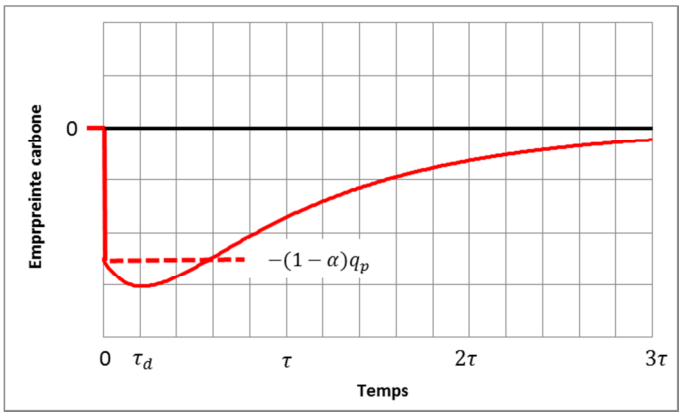


Figure II-9 – Variation de l'empreinte carbone dans l'hypothèse de combustion de la récolte

II-3-3 Conséquences en matière de comptabilité carbone dans le contexte forestier

Comme le montrent les figures II-6 et II-9, l'empreinte carbone de la forêt et de l'utilisation de son bois se forme dans le temps et ne peut se résumer à un seul chiffre comme c'est le cas, le plus souvent, pour des actions, des activités, des productions dans lesquelles l'émission de carbone peut être considérée comme instantanée et où il n'y a pas de capture. Compte tenu des valeurs habituelles de la constante de temps principale τ, l'échelle des temps se gradue ici en décennies ou en siècles et va donc bien au-delà des échéances climatiques. D'où la nécessité de se fixer un horizon de temps compatible avec ces échéances, à l'exemple de ce qui se pratique pour comparer les pouvoirs de réchauffement global (PRG) des différents gaz à effet de serre.

L'expression (II-18) de l'empreinte carbone fait apparaître trois termes dont les variations sont représentées sur la figure (II-10) par les courbes (a), (b) et (c), l'empreinte même correspondant à la courbe rouge. Le premier terme $\left[-(1-\alpha)q_p\right]$ correspond à la masse de carbone renvoyée dans l'atmosphère par la combustion de la récolte, supposée immédiate [courbe (a)]. Le second terme $\left\{-\alpha q_p[1-exp(-t/\tau_d)]\right\}$ où αq_p est le contenu carbone des pertes d'exploitation, représente la masse de carbone rendue à l'atmosphère par la décomposition de ces pertes pendant l'intervalle de temps $(0,t)$; ce terme varie donc de 0 pour $t=0$ à la valeur asymptotique $-\alpha q_p$ pour $t\to\infty$ [courbe (b)]. Le dernier terme qui varie de 0 pour $t=0$ à q_p pour $t\to\infty$, figure le recouvrement progressif de la masse de carbone prélevée q_p [courbe (c)].

En se référant à la figure 10 ou à l'expression (II-18), on voit que si l'horizon de temps qu'on se fixe est rapproché, très inférieur à τ_d et τ, l'empreinte carbone se réduit approximativement à la masse

$(1-\alpha)q_p$ émise par combustion. On justifie alors la comptabilisation carbone de bon sens (mais à courte vue) qui considère que le bois que l'on brûle rend simplement son carbone à l'atmosphère. Pour un horizon de temps petit devant τ mais grand devant τ_d (τ_d est généralement bien inférieur à τ), on rajoute le contenu carbone αq_p des pertes d'exploitation et l'empreinte est approximativement égale à q_p c'est-à-dire à l'entière masse de carbone prélevée. Pour des horizons de temps plus lointains, l'évolution de l'empreinte carbone est dictée par le recouvrement naturel de la masse prélevée et, pour $t \to \infty$, on retrouve, comme indiqué plus haut, des conditions de neutralité (stock constant, empreinte carbone nulle). Cette « neutralité carbone » pour les temps « longs » est intéressante du point de vue théorique, mais c'est avec une empreinte carbone non nulle, évolutive, qu'en réalité il faut compter sur des durées de quelques unités de τ, soit de plusieurs décennies à plusieurs siècles dans la plupart des cas.

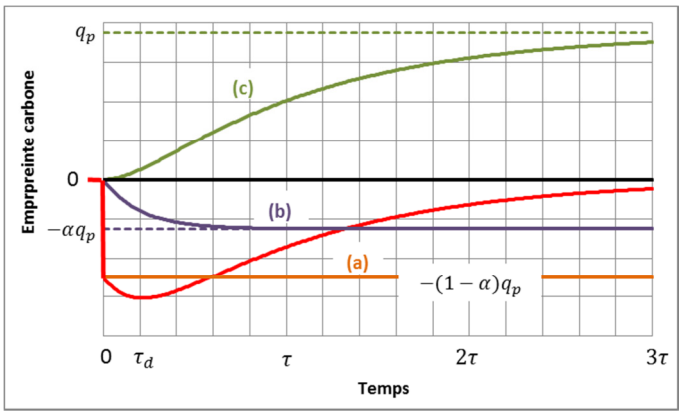


Figure II-10 – Composantes de l'empreinte carbone dans l'hypothèse de combustion de la récolte

II-3-4 Et si le prélèvement affecte la production biologique ?

Si le prélèvement est effectué en plein sur la surface nécessaire, la production biologique et la capture de carbone associée se trouvent brutalement réduites avant d'être progressivement rétablies par régénération naturelle ou plantation et soins sylvicoles. On admet que la dynamique de ce rétablissement est du premier ordre, caractérisée par une constante de temps unique τ_g, en cohérence avec le cadre d'approximation choisi et avec l'hypothèse « mono-moléculaire » de croissance des peuplements forestiers (cf. section I-3). Par rapport au cas précédemment analysé, on pose donc, au lieu de $G(t) = G_0$:

$$G(t) = G_0 - \Delta G exp(-t/\tau_g) \qquad \text{(II-19)}$$

où ΔG est la réduction initiale de production biologique consécutive au prélèvement.

Chacune des expressions (II-13) et (II-14) des variations des stocks $Q(t)$ et $N(t)$ se trouve enrichie d'un terme supplémentaire :

$$Q(t) = \ldots - \frac{\tau\tau_g\Delta G}{\tau-\tau_g}\left[exp(-t/\tau) - exp(-t/\tau_g)\right] \qquad \text{(II-20)}$$

$$N(t) = \ldots - \frac{\tau_g\Delta G}{\tau-\tau_g}\left\{\frac{\tau\tau_d}{\tau-\tau_d}\left[exp(-t/\tau) - exp(-t/\tau_d)\right] - \frac{\tau_d\tau_g}{\tau_g-\tau_d}\left[exp(-t/\tau_g) - exp(-t/\tau_d)\right]\right\} \qquad \text{(II-21)}$$

Les variations des stocks $Q(t)$ et $N(t)$sont représentées graphiquement sur la figure II-11 pour une réduction hypothétique de production $\Delta G = q_p/\tau$ et une constante de temps τ_g intermédiaire entre τ et τ_d.

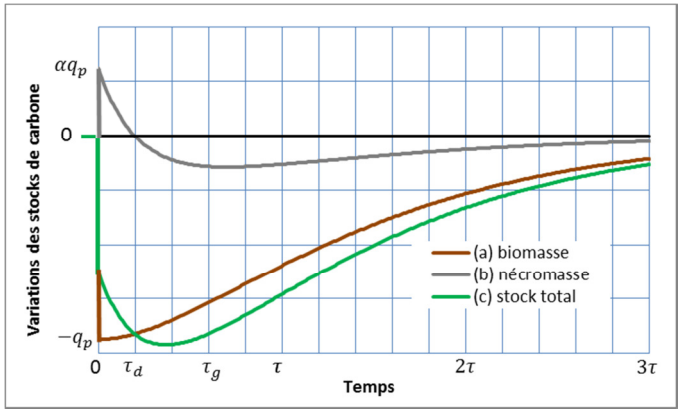


Figure II-11 – Variations des stocks dans l'hypothèse d'une réduction de production biologique consécutive au prélèvement

L'empreinte carbone, qui s'identifie à la variation du stock total, est reportée sur la figure II-12, conjointement avec celle obtenue dans l'hypothèse d'une production inchangée.

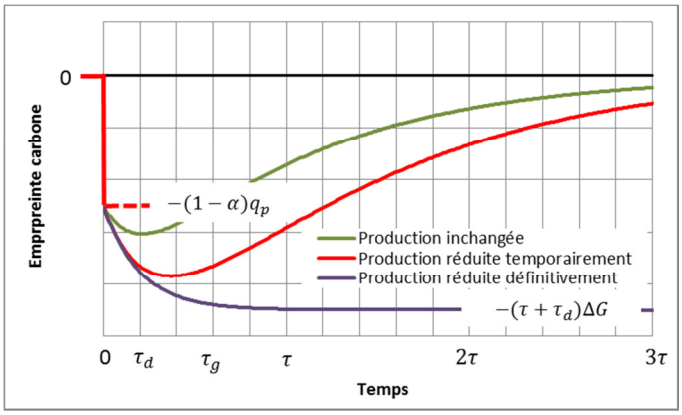


Figure II-12 – Empreintes carbones sans et avec réduction de la production biologique consécutive au prélèvement

Les tendances générales sont les mêmes que précédemment avec des variations amplifiées par la diminution transitoire de la production biologique. Notamment, pour $t \to \infty$, le système forestier retrouve ses conditions initiales (empreinte nulle).

Par contre, si le prélèvement n'est pas suivi d'une reconstitution des peuplements exploités (déforestation), l'empreinte carbone reste toujours négative et tend asymptotiquement vers $-(\tau + \tau_d)\Delta G$ pour $t \to \infty$ (figure II-12). Cette valeur correspond à la somme des variations de stock subies, *in fine*, par les compartiments « biomasse » ($-\tau\Delta G$) et « nécromasse » ($-\tau_d\Delta G$).

II-3-4 Et si l'on conserve le bois au lieu de le brûler ?

Les évolutions des stocks de carbone dans les compartiments forestiers de biomasse et de nécromasse sont les mêmes que précédemment. À ces stocks vient s'ajouter celui du bois conservé. Si ce bois ne subissait aucune dégradation, l'empreinte carbone de l'ensemble qui, rappelons-le, s'identifie à la variation du stock total de carbone, évoluerait comme l'indique la figure II-13 dans les différents cas déjà envisagés d'impact du prélèvement sur la productivité biologique. Les courbes de la figure II-13 se déduisent toutes de celles de la figure II-12, obtenues dans l'hypothèse de combustion de la récolte, par une translation verticale d'amplitude $(1-\alpha)q_p$ correspondant au contenu carbone de la récolte.

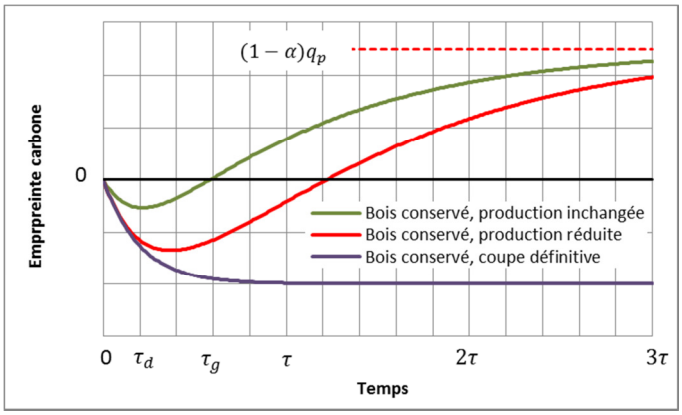


Figure II-13 – Empreinte carbone sans et avec réduction de la production biologique consécutive au prélèvement, dans l'hypothèse de conservation intégrale du bois récolté

S'il n'y a pas d'impact du prélèvement sur la production biologique, l'empreinte carbone, nulle à l'origine, est d'abord négative (émission nette) en raison, principalement, de la décomposition des pertes d'exploitation. Elle devient positive (capture nette) lorsque progresse le recouvrement des stocks de carbone forestier et tendrait vers une valeur asymptotique correspondant au contenu carbone du bois conservé soit $(1-\alpha)q_p$. La conservation du bois récolté peut ainsi contribuer favorablement à la limitation de l'effet de serre, avec cependant des réserves qui touchent à la durée de conservation et au poids des émissions annexes, ici ignorées (cf. troisième partie). Il n'en demeure pas moins que l'empreinte carbone reste négative après prélèvement (émission nette) sur une durée qui dépend de l'importance relative des pertes d'exploitation (α) et qui, étant en relation avec les constantes de temps τ et τ_d, peut être considérable.

Lorsque la production biologique est affectée par le prélèvement, l'empreinte carbone conserve la même tendance asymptotique (capture nette égale au contenu carbone de la récolte), mais la durée de la première phase d'émission nette est accrue et, si l'horizon de temps fixé n'est pas suffisamment lointain, obère l'avantage attendu d'un stockage de bois hors forêt (la constante τ qui fixe l'échelle des temps sur la figure II-13 est, pour la plupart des peuplements forestiers, de l'ordre de plusieurs dizaines d'années à plusieurs siècles). Enfin, la conservation du bois ne permet en aucun cas de compenser l'effet négatif d'une coupe définitive (déforestation).

Les tracés de la figure II-13 supposent une conservation effective de la totalité du bois récolté sur une période de temps grande devant la constante de temps principale τ du peuplement forestier

producteur. Il faut en réalité compter avec un certain taux de dégradation ou de décomposition du bois conservé, même si le matériau, lorsqu'il est à l'abri de l'humidité et des insectes xylophages, peut défier le temps. En admettant que le stock B de bois récolté se décompose suivant une dynamique du premier ordre de constante de temps τ_{vie} , on peut écrire :

$$B(t) = (1-\alpha)q_p exp(-t/\tau_{vie}) \qquad \text{(II-22)}$$

L'empreinte carbone, qui s'identifie à la variation du stock total de carbone en forêt et hors forêt, est donc forcément diminuée, à tout moment, par rapport à celle déterminée en supposant qu'il n'y a pas dégradation ou décomposition, et sa valeur asymptotique, pour $t \gg \tau$ et τ_{vie}, est toujours « zéro » excepté dans le cas d'une coupe partielle définitive où cette valeur asymptotique reste $[-(\tau+\tau_d)\Delta G]$ (cf. troisième partie).

II-3-5 Généralisation

Pour faciliter la compréhension, on a supposé jusqu'ici que les conditions initiales étaient celles d'un état permanent statique. En réalité, les variations présentées par les figures II-9, II-12 ou II-13 sont générales, représentatives, sous réserve de linéarité, des conséquences d'un prélèvement ponctuel dans une forêt dont l'évolution peut être a priori quelconque. Dans le cadre d'approximation adopté pour décrire l'évolution du système forestier (linéarité, invariance), les fluctuations des différentes grandeurs consécutivement au prélèvement, stocks, flux et empreintes, obéissent en effet aux mêmes équations que les grandeurs mêmes, avec des conditions initiales nulles par raison de continuité.

La figure II-14 représente ainsi la formation de l'empreinte carbone pour un prélèvement supplémentaire ponctuel (cf. figure II-9) intervenant en cours d'évolution d'un peuplement soumis depuis l'origine à un prélèvement continu constant (cf. figure II-6). Les hypothèses, non restrictives, sont ici une production biologique constante, non affectée par le prélèvement, et la combustion de l'entière récolte.

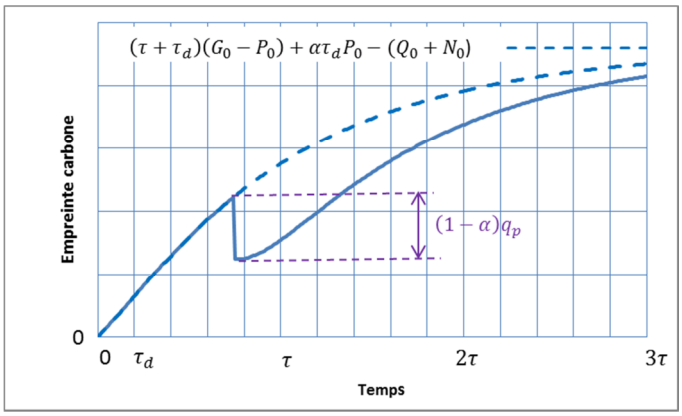


Figure II-14 – Evolution de l'empreinte carbone dans un scénario mixte de prélèvement ponctuel surimposé à un prélèvement continu constant (cf. figures II-6 et II-9)

Par les propriétés générales des systèmes linéaires (cf. section I-1) et par l'intégrale de convolution (II-12), des scénarios de complexité quelconque peuvent être envisagés de la même manière pourvu

que le système forêt-bois puisse être considéré, en première approximation, comme effectivement linéaire et invariant pour ce qui est de la dynamique du carbone (cf. première partie du document).

II-4 Conclusion

Réduite à l'essentiel, la description des échanges de carbone entre compartiments forestiers et entre ceux-ci et l'atmosphère montre à l'évidence la fragilité des conceptions sur lesquelles repose encore aujourd'hui la comptabilité carbone en matière forestière, notamment la prétendue « neutralité » des usages combustibles du bois vis-à-vis de l'effet de serre.

L'empreinte carbone de la forêt et des usages de son bois n'est pas réductible à une simple quantité mais se forme dans le temps comme la résultante de trois facteurs principaux : la création variable et continue de biomasse par photosynthèse, à laquelle correspond un emprunt de carbone à l'atmosphère, la décomposition progressive de la nécromasse issue de la mortalité naturelle et des pertes d'exploitation, les prélèvements suivis de la combustion ou de la décomposition du bois récolté. L'échelle des temps à considérer est essentiellement définie par le temps τ de renouvellement du carbone (ou de la biomasse) dans le peuplement forestier considéré, et se compte donc, en général, en dizaines d'années ou en siècles. D'autres constantes de temps interviennent, dont celles de décomposition de la nécromasse et des produits bois tirés de la forêt, mais l'ordre de grandeur de ce temps τ fait que toute action touchant aux facteurs principaux indiqués plus haut se répercute encore sur l'évolution de l'empreinte carbone bien au-delà des échéances auxquelles l'humanité doit faire face dans son effort d'atténuation du changement climatique.

Aussi ne peut-on se contenter, pour justifier la récolte de bois, de l'idée selon laquelle la forêt qui pousse remplace la forêt qu'on coupe. Les « cas d'école » analysés dans les sections précédentes montrent bien que, même si cela était, on doit tenir compte de ce que les arbres qu'on abat ont accumulé du carbone pendant peut-être un siècle, que leur bois peut être brûlé en un rien de temps ou se décomposer en l'espace de quelques années et qu'il faut un autre siècle pour reconstituer le stock. Notamment, les exemples traités dans la section II-3 indiquent que, sauf si le bois récolté est entièrement conservé sur de très longues durées, toute action de prélèvement conduit à une empreinte carbone négative sur toute la période de recouvrement du stock. Il serait cependant hâtif de conclure définitivement sans comparer cette empreinte carbone, pour ce qui est des usages du bois, aux empreintes carbone de combustibles ou matériaux concurrents, compte tenu des émissions annexes de mise en œuvre (cf. troisième partie).

***

TROISIÈME PARTIE

EMPREINTE CARBONE DES USAGES DU BOIS

La variation du stock global de carbone, en forêt et hors forêt, est l'image des échanges du système forêt-bois avec l'atmosphère et, face à l'augmentation de l'effet de serre, tout devrait être fait pour augmenter ce stock. Tout prélèvement de matière ligneuse ayant pour effet de diminuer le stock de carbone forestier, au moins momentanément, il importe de savoir si une utilisation judicieuse du bois récolté peut permettre de compenser cette diminution dans des délais compatibles avec les échéances climatiques, directement ou par le biais de substitutions favorables vis-à-vis d'autres sources d'énergie ou d'autres matériaux. Si la réponse est négative, au moins pourra-t-on se poser la question, pour chaque usage, de son caractère indispensable ou, tout au moins, de son utilité.

III-1 Représentation des usages du bois

La figure III-1 est une représentation schématique des usages des bois, réduite à l'essentiel mais suffisante pour le présent propos.

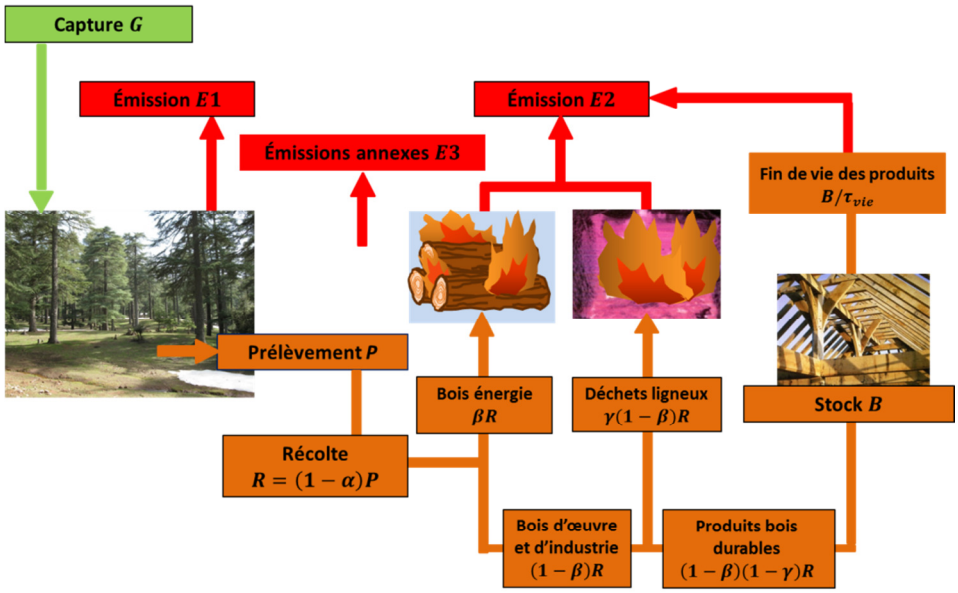


Figure III-1 – Schéma simplifié des usages du bois récolté

Tous les flux et stocks indiqués sont des fonctions du temps t et s'expriment, à volonté, en termes de volume de bois, de masse anhydre, ou de contenu carbone, étant entendu que, en moyenne statistique, ces grandeurs sont proportionnelles. On a approximativement :

1 m^3 de bois ≈ 500 kg (anhydre) ≈ 250 kg de carbone.

En raison des pertes d'exploitation qui sont une fraction notable α du prélèvement en forêt P, la récolte R est inférieure au prélèvement. De la récolte R, une fraction β est brûlée de manière quasi-immédiate pour répondre à des besoins de chaleur ; la part « noble » alimente les filières de fabrication des produits bois, les déchets de fabrication (fraction γ) pouvant être utilisés pour produire de l'énergie. Les produits bois nouvellement fabriqués alimentent un stock B de carbone « hors forêt ». Ces produits ont une durée de vie limitée et, lorsqu'ils sont hors d'usage, finissent par rendre leur carbone à l'atmosphère, par combustion ou décomposition. L'émission E_2 cumule les émissions issues du bois récolté. L'émission E_3 rassemble les émissions « amont » liées aux actions de sylviculture et à toutes les opérations qui vont de l'abattage des arbres à la mise à disposition du combustible ou du matériau ainsi que les émissions « grises » des processus de fabrication des produits bois. Le flux de carbone G correspondant à la production de matière ligneuse (capture) et l'émission E_1 résultant de la décomposition de la nécromasse en forêt ne sont figurés ici que pour mémoire (cf. deuxième partie). Les paramètres α, β, γ sont admis comme données fixes.

Le stock de carbone B dans les produits bois est un « compartiment » auquel, dans le cadre d'approximation fixé (linéaire, invariant), on applique la formulation résumée par la figure I-1. Cette formulation revient ici à admettre que la masse de carbone rendue chaque année à l'atmosphère par les produits bois est proportionnelle à la masse totale de carbone dans ces produits, qu'ils soient ou non en usage. On ne fait donc pas de distinction, parmi les produits non recyclés en fin de vie, entre ceux qui servent de combustible et ceux qui, placés en décharge, se décomposent de manière progressive. Le coefficient de proportionnalité est homogène à l'inverse d'un temps et, noté $1/\tau_{vie}$, fait apparaître le paramètre τ_{vie} comme constante de temps caractéristique du compartiment (Pingoud et coll. 2003). En application du résultat général I-1, on a :

$$B(t) = \left\{B_0 + \int_0^t \Phi_b(t')exp(t'/\tau_{vie})\, dt'\right\} exp(-t/\tau_{vie}) \qquad \text{(III-1)}$$

où $\Phi_b(t) = (1-\beta)(1-\gamma)R(t)$ représente le flux de carbone lié aux produits bois nouvellement fabriqués et B_0 est le stock de carbone dans les produits bois à l'origine des temps choisie. Soit encore :

$$B(t) = \left\{B_0 + (1-\beta)(1-\gamma)\int_0^t R(t')exp(t'/\tau_{vie})\, dt'\right\} exp(-t/\tau_{vie}) \qquad \text{(III-2)}$$

En considérant que la combustion du bois destiné à l'énergie et celle des déchets de fabrication sont quasi synchrones de la récolte, le flux d'émission $E_2(t)$ issu des bois récoltés a pour expression, en sommant les diverses contributions :

$$E_2(t) = B(t)/\tau_{vie} + [\beta + \gamma(1-\beta)]R(t) \qquad \text{(III-3)}$$

ou, plus simplement, pour raison de conservation :

$$E_2(t) = R(t) - dB(t)/dt \qquad \text{(III-4)}$$

Par rapport à l'analyse précédente de la dynamique forestière pour laquelle l'hypothèse de travail était la combustion de l'entière récolte $R(t)$ (cf. sections II-2-3 et II-3-2), la prise en compte d'usages du bois autres que celui de combustible se traduit donc par une augmentation ou une diminution d'émission, selon le signe de $[-\,dB(t)/dt]$ et l'empreinte carbone définie par l'expression (II-7) inclut, comme il se doit, la variation du stock de carbone dans les produits bois :

$$\int_0^t [dB(t)/dt]dt = B(t) - B_0 \qquad \text{(III-5)}$$

Sur ces bases, l'analyse du système forêt-bois entamée dans la deuxième partie du document peut être poursuivie en y intégrant l'empreinte carbone de l'usage du bois récolté.

III-2 Empreinte carbone de l'usage du bois récolté

Pour des raisons théoriques explicitées en introduction de la section II-3 et pour faciliter la compréhension, on s'intéresse ici aux conséquences d'un prélèvement ponctuel de contenu carbone q_p, opéré en forêt l'année « 0 » choisie pour origine des temps et au bilan carbone de l'utilisation que l'on fait du bois récolté. Dans le cadre d'approximation adopté pour décrire l'évolution du système forestier (linéarité, invariance), les fluctuations des différentes grandeurs consécutivement au prélèvement, stocks, flux et empreintes, obéissent aux mêmes équations que les grandeurs mêmes, avec des conditions initiales nulles par raison de continuité. Si donc on ne s'intéresse qu'à ces fluctuations, il n'est pas nécessaire de préciser l'évolution du système forestier hors ce prélèvement, celle-ci pouvant être quelconque (cf. section II-3-5). En toute rigueur, il conviendrait d'accentuer ($\widehat{\ }$) les symboles des fluctuations pour les distinguer des grandeurs entières. Le risque de confusion n'existant pas dès lors qu'il est déclaré qu'on ne s'intéresse qu'à ces fluctuations, on se dispensera de ce raffinement pour ne pas alourdir les écritures.

La figure III-2 rappelle l'évolution de l'empreinte carbone intrinsèque (i.e. abstraction faite des émissions annexes et grises) d'un prélèvement de contenu carbone q_p en forêt, opéré en un temps court et supposé sans impact sur la productivité biologique <u>brute</u> G, la récolte étant immédiatement consumée (cf. section II-3). Cette empreinte représente la masse nette de carbone échangée avec l'atmosphère entre le moment où le prélèvement est opéré ($t = 0$) et tout instant $t > 0$. L'empreinte est ici négative, correspondant à une émission nette selon la convention de signe adoptée (cf. section II-1). Le contenu carbone q_p du prélèvement est rendu à l'atmosphère, pour partie instantanément [émission par combustion du bois récolté $(1-\alpha)q_p$] et, pour le reste, de manière étalée dans le temps [décomposition des pertes d'exploitation αq_p avec une constante de temps τ_d]. Cependant, la production biologique <u>nette</u> de la forêt (production brute, supposée inchangée, moins mortalité) se trouve accrue consécutivement au prélèvement, ce qui tend à effacer les conséquences de cette perturbation suivant une dynamique principalement dictée par la constante de temps principale τ des variations de biomasse ligneuse. Pour $t \to \infty$, l'empreinte carbone intrinsèque du prélèvement finit par s'annuler.

Suivant les usages que l'on fait effectivement des bois récoltés, la variation de stock (III-5) dans les produits bois doit être algébriquement ajoutée à l'empreinte carbone correspondant à la combustion de l'entière récolte. Pour un prélèvement ponctuel en forêt d'une masse q_p, représenté par $P(t) = q_p\delta(t)$, cette variation s'écrit, d'après III-2 avec $B_0 = 0$, sous la forme :

$$B(t) = (1-\alpha)(1-\beta)(1-\gamma)q_p exp(-t/\tau_{vie}) \qquad \text{(III-6)}$$

À titre d'exemple, on a reporté sur la même figure III-2 l'empreinte compte tenu d'un stockage dans les produits bois pour des valeurs de paramètres représentatives des conditions présentes d'exploitation et d'utilisation des bois, $\alpha \approx 0{,}3$ (rapport des pertes au prélèvement, en incluant les racines des arbres exploités) $\beta \approx 0{,}5$ (fraction de la récolte directement utilisée comme combustible), $\gamma \approx 0{,}5$ (proportion de déchets dans la matière ligneuse servant à l'élaboration de produits, ces déchets étant consumés pour produire de l'énergie), $\tau_{vie} \approx 0{,}2\tau$, valeur quelque peu arbitraire prise « par défaut ». On voit que cette empreinte carbone, abstraction faite des émissions annexes ou « grises », ne diffère guère de celle correspondant à la combustion de l'entière récolte et reste négative (émission) quel que soit l'intervalle de temps considéré après prélèvement. Les sections qui suivent ont pour objet de cerner dans quelles limites ce mauvais bilan carbone peut être amélioré par des effets de substitution favorable vis-à-vis d'autres sources d'énergie ou d'autres matériaux.

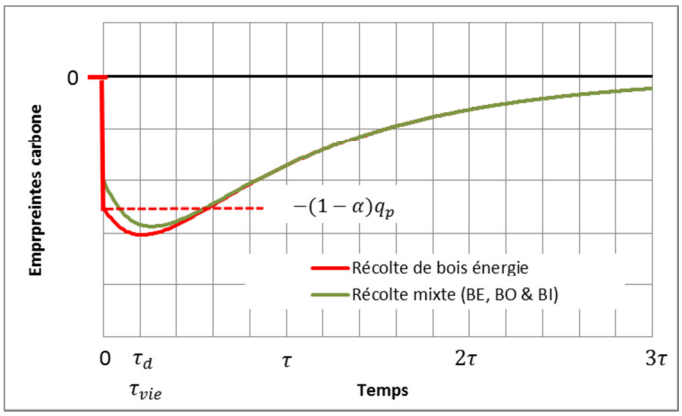


Figure III-2 – Variation de l'empreinte carbone dans l'hypothèse de combustion de la récolte et dans celle d'une utilisation mixte du bois récolté, abstraction faite des émissions annexes
(Utilisation mixte : bois énergie 50 %, produits bois 25 %, déchets de fabrication 25%)

III-3 Bois combustible et substitution « énergétique »

Une opinion extrêmement répandue est que l'usage du bois en remplacement de combustibles fossiles permet d'éviter les émissions de ces derniers. La raison invoquée est celle de « neutralité carbone » des usages énergétiques de la biomasse. Cette assertion est inexacte ou, à tout le moins, trop caricaturale. La réalité est autre : en substituant du bois à un combustible fossile, on remplace l'émission de celui-ci par celle de celui-là et comme le facteur d'émission du bois est plus élevé que celui de tout autre combustible (IPCC 2006, JRC 2013), la substitution accroît les émissions de combustion au lieu de les réduire (Leturcq 2011). La capture de carbone par l'activité photosynthétique de la forêt productrice peut permettre, effectivement, le « remboursement » de la « dette carbone » ainsi créée mais cette compensation n'est que progressive, s'étalant sur une période de temps qui va, le plus souvent, bien au-delà des échéances climatiques de la fin de ce siècle.

Pour un prélèvement en forêt portant sur une masse de carbone q_p, l'énergie W libérée par combustion du bois récolté a pour expression :

$$W = (1-\alpha)q_p/F_b \qquad \text{(III-7)}$$

où F_b est le facteur d'émission carbone intrinsèque du bois. Pour cette même énergie, l'émission E_s de toute autre source de facteur d'émission intrinsèque F_s serait :

$$E_s = WF_s = \frac{F_s}{F_b}(1-\alpha)q_p \qquad \text{(III-8)}$$

Les émissions annexes étant comptées à part, l'expression (III-8) représente, après changement de signe, l'empreinte carbone intrinsèque de l'usage de cette autre source pour la même énergie rendue W. Cette empreinte est constante, indépendante de la variable temps et est représentée sur la figure III-3 par une droite horizontale d'ordonnée comprise entre 0 et $[-(1-\alpha)q_p]$ car, généralement, $F_s < F_b$.

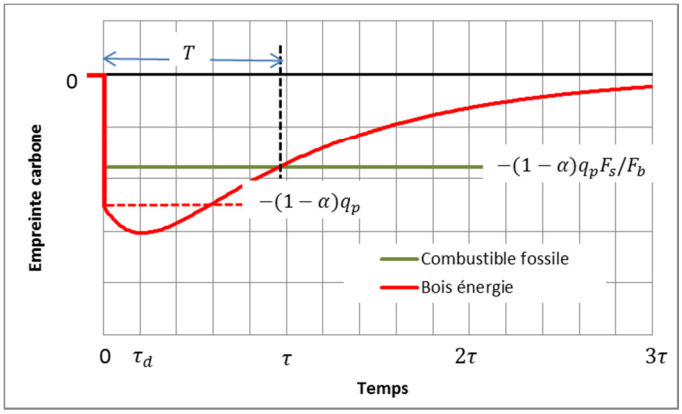


Figure III-3 – Comparaison de l'empreinte carbone du bois énergie et de celle d'un combustible fossile pour la même quantité de chaleur produite, abstraction faite des émissions annexes

L'usage du bois comme combustible apparaît alors comme intrinsèquement défavorable, comparé à celui de toute autre source d'énergie, si l'horizon de temps fixé pour faire face aux échéances climatiques se situe en deçà du temps T correspondant au point de croisement des courbes représentatives des empreintes carbone de la figure III-3. L'empreinte carbone de l'usage du bois est par contre moindre que celle du combustible fossile au-delà. Il importe de souligner que l'échelle des temps de cette figure est graduée en unités de τ qui est la constante de temps principale de la dynamique du carbone forestier, constante de temps dont la valeur habituelle est, pour la majorité des peuplements, de l'ordre de plusieurs décennies à quelques siècles (cf. section I-4). Le temps T correspond au « temps de retour carbone » (terminologie de l'ADEME 2015) ou au « time to carbon sequestration parity » (terminologie de Mitchell et coll. 2012 et d'autres auteurs, Agostini et coll. 2014, Ter Mikaelian et coll. 2015b).

Le tableau III-1 indique les facteurs d'émission intrinsèques des principaux combustibles fossiles (ADEME 2016) et situe approximativement par rapport à τ la fenêtre de temps T pendant laquelle l'usage de ces combustibles est préférable à celui du bois énergie, abstraction faite des émissions « amont ». On a admis que la constante de temps τ_d de décomposition de la nécromasse est nettement plus petite que la constante de temps principale, comme c'est le cas le plus souvent (ici, rapport 1/5). Il est clair que si la source d'énergie alternative est non carbonée (nucléaire, hydraulique, solaire, éolienne...), l'emploi de cette source est préférable à celle du bois quel que soit l'horizon de temps fixé.

Source d'énergie	Facteur d'émission (tC/tep)	Temps T de retour carbone
Bois bûche H 20%	1,17	-
Charbon aggloméré	1,09	0,67τ
Pétrole brut	0,83	0,96τ
Gaz naturel	0,64	1,23τ
Source non carbonée	0	∞

Tableau III-1 – Facteurs d'émission des principaux combustibles et « temps de retour carbone » pour une substitution de bois énergie à ces combustibles

(τ représente le temps moyen de renouvellement de la matière ligneuse dans la forêt de production)

Cette première comparaison entre le bois énergie et les sources de chaleur concurrentes se complique quelque peu lorsqu'on prend en compte l'impact du prélèvement sur la production biologique, d'une part, les émissions « amont », d'autre part.

III-3-1 Prise en compte de l'impact du prélèvement sur la production biologique

Le prélèvement d'arbres vifs, lorsqu'il est effectué « en plein », réduit la surface de captage du carbone et, par conséquent, la productivité biologique brute de l'ensemble forestier considéré. Pour un peuplement homogène, ou en raisonnant « en moyenne », on peut admettre la proportionnalité de la réduction initiale ΔG_0 à celle de la surface de couvert et donc à l'importance q_p du prélèvement, soit, en valeurs relatives :

$$\Delta G_0/G_0 = -q_p/Q_0 \qquad \text{(III-9)}$$

i.e. :

$$\Delta G_0 = -(G_0/Q_0)q_p \qquad \text{(III-10)}$$

où G_0 et Q_0 sont les valeurs de la production biologique et du stock sur pied au moment du prélèvement. Le rapport G_0/Q_0 peut être quelconque, *a priori*. Cependant, dans les situations pas trop éloignées de l'équilibre pour lesquelles Q_0 n'est pas très différent de $\tau(G_0 - P_0)$ (cf. section II-2-1), ce rapport a pour valeur minimale $1/\tau$ $(P_0 = 0)$ et reste de cet ordre de grandeur (de $1/\tau$ à quelques unités de $1/\tau$) pour les taux de prélèvement P_0/G_0 habituels.

La réduction de production ΔG_0 est définitive si le peuplement, là où il a été coupé, n'est pas reconstitué (déforestation). Mais en général, la production biologique et la capture de carbone associée se trouvent progressivement rétablies par régénération naturelle ou plantation. La dynamique de ce rétablissement est supposée être du premier ordre, en cohérence avec le cadre d'approximation choisi, c'est-à-dire caractérisée par une constante de temps unique τ_g (cf. section I-3), et on doit poser :

$$\Delta G(t) = (\Delta G_0 - \Delta G_0')exp(-t/\tau_g) + \Delta G_0' \qquad \text{(III-11)}$$

où $\Delta G_0'$ représente l'écart qui peut subsister entre la production d'origine et la production recouvrée, notamment dans le cas où le rétablissement de l'état boisé fait appel à d'autres essences ou à des traitements sylvicoles différents.

La variation de l'empreinte carbone pour $\Delta G_0 = -q_p/\tau$, $\Delta G_0' = 0$ et $\tau_g < \tau$ est représentée sur la figure III-4 conjointement avec celle qui correspond à une production biologique inchangée. La période de temps T pendant laquelle l'usage du bois énergie est plus émissif que celui d'autres sources, est prolongée par rapport au cas précédent. Ce temps de retour carbone est évidemment d'autant plus grand que la réduction initiale de production est plus élevée.

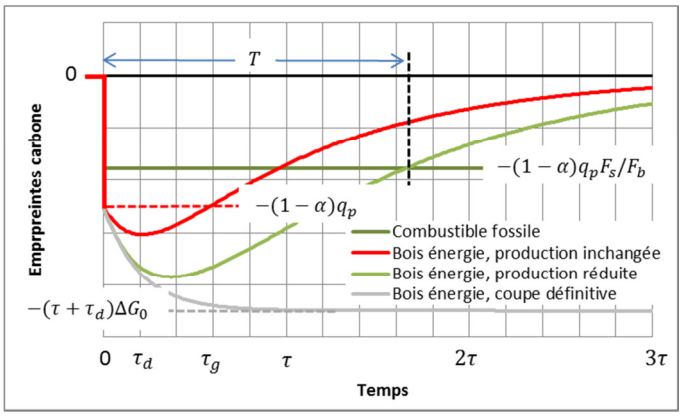


Figure III-4 – Prise en compte, par rapport à la figure III-3, de l'impact temporaire ou définitif du prélèvement sur la productivité biologique brute.

Par contre, si le prélèvement n'est pas suivi d'une reconstitution des peuplements exploités (déforestation), l'empreinte carbone reste toujours négative et tend asymptotiquement vers $[-(\tau+\tau_d)\Delta G_0)]$ pour $t \to \infty$ soit, dans les conditions d'exemple de la figure III-4, vers $[-(1+\tau_d/\tau)q_p]$, de valeur absolue supérieure à q_p.

III-3-2 Prise en compte des émissions annexes, « amont » et autres émissions

Les émissions « amont », exprimées en équivalent carbone, auxquelles il est commode d'associer les émissions à la combustion de faibles quantités d'autres gaz à effet de serre que le dioxyde de carbone – on parlera donc d'émissions « annexes » – sont d'importance extrêmement variable tant pour le bois que pour les énergies concurrentes en fonction, notamment, des difficultés d'exploitation ou d'extraction, des distances de transport, des infrastructures nécessaires, etc... en sorte qu'on ne peut aboutir à des conclusions fermes que cas par cas. Des « moyennes » admissibles dans leurs ordres de grandeur sont néanmoins avancées dans quelques bases de données. Les chiffres indiqués dans le tableau III-2 sont empruntés à la base carbone de l'ADEME (ADEME 2016) ; les émissions sont exprimées en tonnes « équivalent carbone » et rapportées à l'unité de chaleur produite : ici la « tonne-équivalent-pétrole ». Les facteurs d'émission annexes ΔF apparaissent très inférieurs aux facteurs d'émission intrinsèques F dans tous les cas de combustibles carbonés.

Admises comme localisées dans le temps, synchrones du prélèvement et de l'usage des combustibles, les émissions annexes ajoutent algébriquement un terme constant aux empreintes carbone intrinsèques précédemment déterminées. Ainsi, pour un prélèvement en forêt de contenu carbone q_p et une proportion de pertes α en exploitation, l'empreinte carbone du prélèvement de bois pour l'énergie est accrue (en valeur absolue) de la quantité $(1-\alpha)q_p\,\Delta F_b/F_b$ (indice b pour le bois) cependant que celle de l'utilisation d'une autre source l'est de $(1-\alpha)q_p\Delta F_s/F_b$ (indice s pour la source alternative). La figure III-5, à comparer avec la figure III-4, illustre la prise en compte des

émissions annexes dans le cas de la comparaison bois /pétrole brut ($F_b = 1{,}17$ tC/tep, $F_s = 0{,}83$ tC/tep, $\Delta F_b = 0{,}093$ tC_{eq}/tep, $\Delta F_s = 0{,}077$ tC_{eq}/tep). Comme les émissions annexes, pour le bois et pour les sources concurrentes, ont même ordre de grandeur et sont très inférieures aux émissions intrinsèques, les conclusions en ce qui concerne les horizons de temps T ne sont pas significativement modifiées.

Source d'énergie	Émission intrinsèque F (tC/tep)	Émissions annexes ΔF (tC_{eq}/tep)	Ratio
Bois bûche H 20%	1,17	0,093	7,9 %
Charbon aggloméré	1,09	0,110	10,1 %
Pétrole brut	0,83	0,077	9,2 %
Gaz naturel	0,64	0,109	17,0 %
Electricité (mix F)	0,168		

Electricité : « mix » français

Tableau III-2 – Valeurs-types des émissions de carbone rapportées à l'énergie produite pour différentes sources (Données de la « base carbone » de l'ADEME, sauf pour le bois)
[Une tonne-équivalent-pétrole (tep) équivaut à 41,87 gigajoules]

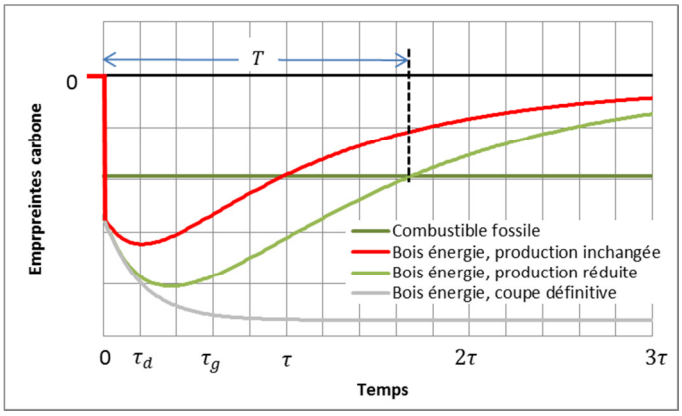


Figure III-5 – Modification de la figure III-4 par prise en compte des émissions annexes.
(illustration pour le cas du pétrole brut)

III-4 Bois conservé et substitution « matériau »

Si le bois récolté est entièrement et durablement conservé au lieu d'être brûlé, son contenu carbone s'ajoute au stock forestier en sorte que la représentation de l'empreinte carbone du prélèvement et de l'utilisation du bois est simplement translatée positivement de la valeur de ce contenu, selon l'axe des ordonnées, par rapport à celle obtenue dans l'hypothèse de combustion de la récolte (cf. figure II-13). Dans le cas présent, l'empreinte est alors nulle à l'origine et tend asymptotiquement vers la valeur $(1-\alpha)q_p$ pour les temps longs, son évolution restant semblable en tous points à celle correspondant à la récolte consumée, compte tenu de ce décalage (figure III-6).

Les deux tracés de la figure III-6 bornent la plage dans laquelle s'inscrirait l'empreinte pour une récolte mixte, selon les proportions de bois utilisées pour l'énergie, pour un usage durable, ou

partiellement vouée à décomposition (émissions annexes mises à part). Quel que soit l'usage du bois, l'empreinte carbone reste donc négative après récolte (émission) sur une durée qui, dans le cas le plus favorable d'une récolte ligneuse entièrement et durablement conservée ne peut être inférieure à $\tau \ln[1/(1-\alpha)]$, valeur limite obtenue lorsque τ_d est très inférieur à τ.

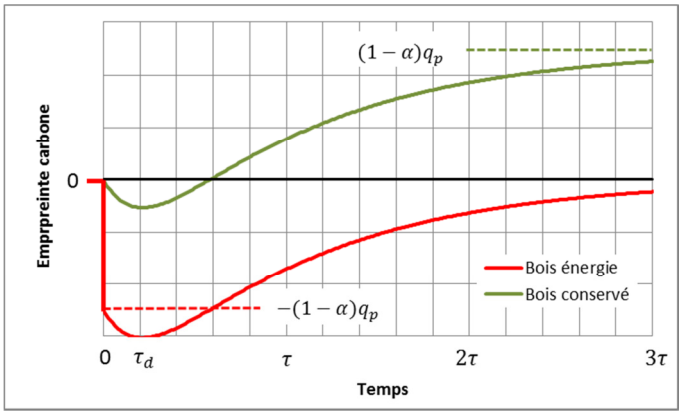


Figure III-6 – Empreinte carbone d'un prélèvement ponctuel
selon que le bois récolté est brûlé ou conservé

Pour que l'empreinte d'un prélèvement devienne positive (capture nette), au moins à terme, il faudrait par conséquent proscrire un usage énergétique direct ($\beta = 0$) et conserver la plus grande part de la matière ligneuse récoltée, le plus longtemps possible. Les paramètres sur lesquels il est alors possible de jouer sont la part γ des déchets dans la matière ligneuse récoltée, déchets dont le carbone est généralement vite rendu à l'atmosphère par leur emploi comme combustible, et la durée de vie τ_{vie} des produits fabriqués, supposés eux aussi brûlés au terme de leur usage.

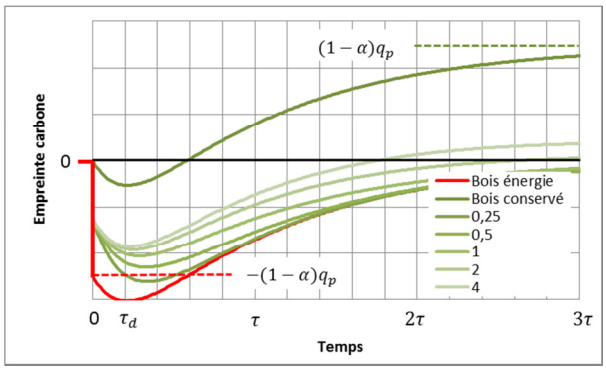


Figure III-7 : $\gamma = 0{,}5$

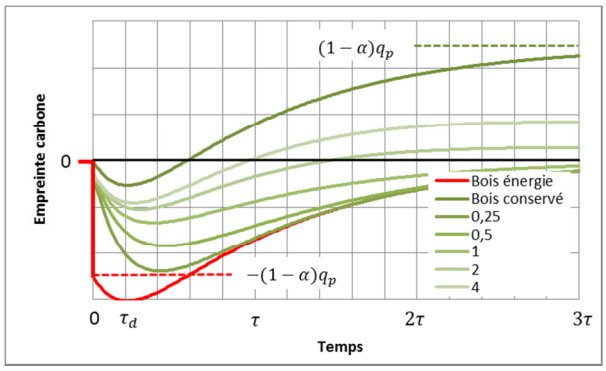


Figure III-8 : $\gamma = 0{,}1$

Influence de la durée de vie des produits bois (rapport τ_{vie}/τ variant de 0,25 à 4)
pour deux valeurs de la proportion γ de déchets de fabrication
(abstraction est faite des émissions annexes)

Les figures III-7 et III-8 montrent les variations de l'empreinte carbone selon la durée de vie τ_{vie} rapportée à la constante de temps principale τ (rapport de 0,25 à 4), pour deux valeurs du paramètre γ a priori favorables pour l'empreinte carbone. La première $\gamma = 0{,}5$ est représentative du « rendement matière » global des processus d'élaboration actuels de bois d'œuvre (FCBA 2018), la

seconde $\gamma = 0{,}1$ correspondrait à des usages privilégiant la conservation du maximum du bois récolté, tels que les constructions en rondins de bois brut (fuste) ou en bûches écorcées (bois cordé). Abstraction est faite ici des émissions annexes et « grises ». Dans tous les cas, l'empreinte tend vers zéro pour les temps longs ($t \to \infty$).

Ces résultats montrent que le rôle de stockage du carbone dévolu aux produits bois ne peut directement compenser, sauf exception, la diminution du stock de carbone forestier qu'implique le prélèvement, d'autant que les émissions annexes, les émissions grises, et la réduction temporaire de production biologique de la forêt si le prélèvement affecte le couvert (coupe d'une certaine étendue) pèsent lourdement sur le bilan carbone. La figure III-9 reproduit la figure III-7 dans le cas d'une somme d'émissions « amont » (émissions liées à la récolte) et « grises » (émissions liées à la fabrication de produits) équivalant à 20% du contenu carbone de la récolte et d'une hypothèse de recouvrement de la production biologique, supposée initialement réduite d'une valeur q_p/τ, avec une constante de temps τ_g intermédiaire entre τ_d et τ. Les courbes représentatives de l'évolution des empreintes carbone sortent de la plage qui avait été précédemment définie dans le cas idéal où les émissions amont et grises sont négligeables et où le prélèvement en forêt n'a pas d'impact sur la production biologique. L'empreinte carbone ne redevient temporairement positive que pour des valeurs très élevées de la durée de vie des produits ($\tau_{vie} > 6{,}5\tau$, empreinte positive pour $t > 5\tau$, hors du cadre de l'épure) et, pour les temps « longs » ($t \to \infty$), tend dans tous les cas vers une valeur négative imposée par les émissions amont et grises (ici 20% du contenu carbone de la récolte).

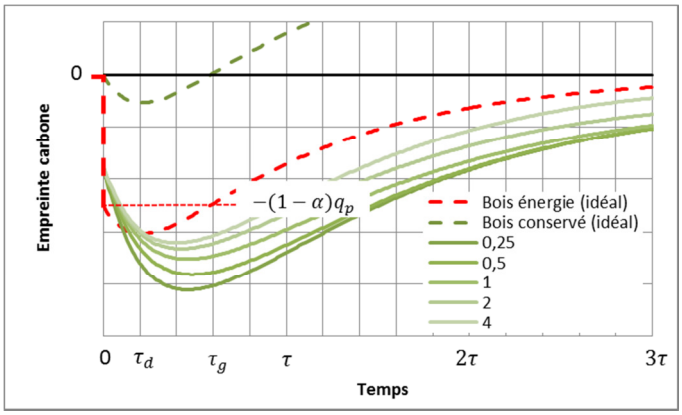


Figure III-9 – Reprise de la figure III-7 en tenant compte des émissions annexes
et de l'impact du prélèvement sur la production biologique G

Ce n'est donc que par un effet bénéfique de substitution à des produits dont la fabrication s'accompagne d'un volume d'émission important que la séquestration de carbone dans les produits bois pourrait, malgré tout, jouer un rôle positif vis-à-vis de l'effet de serre.

L'empreinte carbone du produit substituable, pour un même usage et une même durée de vie que le produit bois concurrent, peut être représentée sur des graphiques tels que celui de la figure III-9 par une droite horizontale d'ordonnée E_{sub} dans la mesure où cette empreinte est fixée dès l'élaboration du produit. Apparaissent alors les plages de temps t sur lesquelles la substitution, si elle est effectivement réalisée, permet d'obtenir une empreinte carbone globale positive pour le produit bois. La figure III-10 donne un exemple, tiré de la figure III-9 pour $\tau_{vie} = \tau$. Pour que l'empreinte globale, compte tenu du gain de substitution, soit constamment positive, il est nécessaire que, en

valeur absolue, l'empreinte $|E_{sub}|$ du produit substitué soit supérieure à l'extremum de l'empreinte du produit bois, soit ici $1{,}4(1-\alpha)q_p$ approximativement. En rapportant cette valeur au contenu carbone du produit bois qui est $(1-\alpha)(1-\gamma)q_p$, on estime ainsi, dans le cas d'exemple présent ($\gamma = 0{,}5$), à $2{,}8$ tonnes de carbone par tonne de contenu carbone du produit bois l'empreinte minimale (en valeur absolue) du produit substitué pour qu'on puisse considérer comme compensé l'impact « effet de serre » du prélèvement en forêt. Il ne s'agit là que d'un ordre de grandeur, la plage de variation, selon les conditions de récolte (réduction temporaire de la production biologique), les valeurs de γ (déchets de fabrication) et le poids des émissions « amont » et grises, pouvant aller, à titre indicatif, de $0{,}75$ tC/tC (production biologique faiblement perturbée, faible proportion de déchets $\gamma = 0{,}1$; émissions amont et grises représentant 15% du contenu carbone de la récolte, fuste par exemple) à $6{,}4$ tC/tC (production biologique perturbée, proportion de déchets élevée $\gamma = 0{,}75$, émissions amont et grises représentant 25% du contenu carbone de la récolte, menuiserie par exemple).

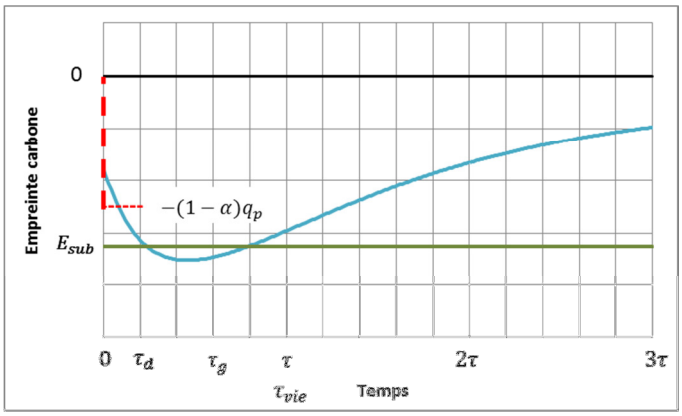


Figure III-10 – Comparaison qualitative des empreintes carbone d'un produit bois et d'un produit concurrent substituable

À partir de méta-analyses du type de celle conduite par Sathre et O'Connor (2010), la plage de variation du coefficient de substitution « matériau » est actuellement évaluée de 0,6 à 3,5 tCO2eq « évitées » par mètre cube de bois contenu dans les produits finis, avec une valeur centrale de 1,6 tCO2eq/m^3 soit, en termes de masses de carbone, de 0,65 à 3,8 tC/tC, avec une valeur centrale de 1,75 tC/tC (Dhôte et coll. 2016). Ces chiffres sont en apparence compatibles avec la plage 0,75 – 6,4 définie plus haut. Il serait cependant prématuré de conclure : les évaluations des empreintes carbone des produits bois répertoriés par les auteurs cités sont généralement adossées à l'assertion de neutralité carbone, ne tiennent donc pas compte du coût carbone réel du prélèvement et portent au crédit du produit bois le prétendu bénéfice de substitution énergétique lié à l'utilisation comme combustibles des déchets de fabrication. Aussi les valeurs indiquées ci-dessus pour le coefficient de substitution « matériau » sont-elles certainement grandement surestimées. En vérité, le bénéfice d'une substitution ne peut être apprécié que cas par cas, au terme d'analyses comparées des cycles de vie des produits concurrents, à usage et durée d'usage comparables, avec prise en compte, pour le produit bois de l'empreinte carbone réelle. La compensation de l'empreinte carbone négative du prélèvement en forêt semble possible pour du bois d'œuvre et des produits judicieusement ciblés, mais il est peu probable que cette compensation soit suffisante pour justifier la mobilisation de bois dans une perspective de séquestration du carbone hors forêt ainsi qu'on l'affirme trop souvent aujourd'hui.

III-5 Conclusion

Compte tenu des pertes d'exploitation, le prélèvement de bois en forêt implique une diminution du stock de carbone forestier supérieure au contenu carbone de la récolte. Certes, après coupe, la régénération de la forêt, qu'elle soit naturelle ou artificielle, peut restaurer progressivement le stock au fil des ans mais la longue constante de temps τ mise en jeu dans ce recouvrement et le caractère toujours hypothétique de celui-ci font qu'en première analyse, on doit considérer cette diminution de stock comme entière pour les horizons de temps rapprochés vis-à-vis de τ. Si le bois récolté est destiné à servir de combustible, cette diminution représente donc, dans une comptabilité sommaire, une estimation du « coût carbone » de la récolte. Si le bois récolté est destiné à la fabrication de produits, une part du contenu carbone de la récolte est conservée, ce qui diminue le « coût » de la récolte par rapport à l'estimation précédente. Mais cette part est assez faible en général, en raison des pertes de matière à la fabrication qui sont brûlées ou se décomposent. Il en résulte que le stockage de carbone dans les produits bois est toujours notablement inférieur au déstockage qu'entraîne la récolte en forêt. Que le bois soit brûlé ou conservé, l'acte de récolte implique donc une variation négative de l'empreinte carbone du système forêt-bois sur un espace de temps considérable. Cette variation se trouve amplifiée par la prise en compte de la durée de vie forcément limitée des produits bois, du « manque à capter », au moins transitoire, qui résulte de l'abattage d'arbres vifs, et des émissions annexes, « amont » et « grises ». On doit conclure, notamment, que, dans toute situation concrète, la récolte avec stockage de carbone hors forêt n'est pas un moyen d'action directe sur le climat, contrairement à l'opinion répandue.

Cependant, les substitutions de bois à d'autres combustibles ou à d'autres matériaux sont généralement présentées comme permettant des réductions d'émissions de GES, la raison avancée étant que le bois serait renouvelable et son usage intrinsèquement neutre vis-à-vis de l'effet de serre. C'est sur cette fiction de « neutralité carbone » que s'appuient, en effet, nombre d'auteurs pour justifier **l'**augmentation des récoltes, au nom de la lutte contre le changement climatique (ADEME 2015, Dhôte et coll. 2016, Oliver et coll. 2014, Pingoud et coll. 2010, Smyth et coll. 2014, Valade et coll. 2017, Deheza et coll. 2014, negaWatt 2017, etc...).

En réalité, la substitution énergétique est contreproductive puisque le facteur d'émission du bois est supérieur à celui de tout autre combustible. Il est vrai, comme cela a été évoqué plus haut, que le recouvrement progressif de la biomasse forestière récoltée, par régénération des peuplements exploités, permet de compenser le différentiel d'émission, mais après un temps généralement supérieur à la constante de temps τ principale de ce recouvrement. Ce paramètre τ étant de l'ordre de quelques dizaines d'années à plusieurs siècles selon les peuplements, les combustibles fossiles sont encore préférables au bois énergie devant la menace climatique imminente et surtout, dès qu'existent en suffisance des sources d'énergie non carbonées, il faut les utiliser et ne plus prélever inutilement du bois en forêt pour répondre aux besoins de chaleur.

La substitution d'un produit bois à un produit réalisé avec d'autres matériaux, équivalent par la fonction et la durée d'usage mais dont le bilan carbone est encore plus défavorable, conduit à une réduction d'émission dont il est normal de créditer le produit bois. L'évaluation de telles substitutions devrait se faire au cas par cas, sur la base d'analyses comparées du cycle de vie des produits substituant et substitué, analyses qui, en ce qui concerne les produits bois, doivent être

fondées sur une comptabilité carbone précise, non sur la simple assertion de neutralité comme c'est souvent le cas actuellement. Il est sans doute possible de trouver des substitutions favorables, notamment dans le secteur de la construction, mais les réductions d'émission espérées ne peuvent être que marginales. En effet, remplacer du papier par du papier, une charpente en bois par une charpente en bois, n'évite aucune émission : il n'y a pas de bénéfice « effet de serre » à attendre d'une production continue de produits bois pour des usages auxquels ces produits sont naturellement destinés. Un tel bénéfice ne peut être enregistré que pour le remplacement effectif, vérifiable, de produits plus émissifs qui, dès lors, n'ont plus à être fabriqués : l'augmentation de la consommation d'un produit bois qui ne fait pas diminuer celle de produits concurrents ne constitue pas une substitution effective mais une addition à la consommation (Déry 2007)

Ces conclusions relatives au coût carbone des récoltes et aux effets de substitution ne doivent pas laisser penser que l'exploitation forestière ne serait pas légitime. Elle signifie seulement que cette exploitation ne peut être justifiée par des raisons d'atténuation du changement climatique. L'exploitation ne devrait répondre, simplement, qu'à des nécessités techniques, économiques, sociales ou sociétales, tout en étant soumise, comme la plupart des activités humaines, à une comptabilité carbone précise permettant de juger, cas par cas, de son bien-fondé (« zéro » pour facteur d'émission de la biomasse n'est pas une comptabilité).

***

QUATRIÈME PARTIE

SCÉNARIOS D'ÉVOLUTION POUR LA FORÊT DE PRODUCTION FRANÇAISE

Les chapitres précédents jettent les bases d'une comptabilisation carbone plus réaliste que le « zéro émission » qui découle de l'assertion de neutralité, ou même que les règles « par défaut » édictées par le GIEC/IPCC (IPCC 1996a), et proposent les éléments permettant de construire à volonté, tel un meccano, des modèles plus ou moins détaillés et complexes des échanges de carbone entre compartiments de stockage, en forêt et hors forêt, et avec l'atmosphère. La dynamique du carbone a été jusqu'ici décrite de manière littérale pour conserver un maximum de généralité et les formulations sont par conséquent applicables à n'importe quel peuplement ou ensemble de peuplements, à l'échelle d'une parcelle, d'un massif forestier ou de la forêt d'un pays tout entier, dès que peuvent être proposées des valeurs réalistes pour les paramètres et spécifiées les contraintes, notamment de récolte ou de prélèvement.

À titre d'illustration, il est intéressant de choisir comme cadre la forêt française de production. La manière de gérer la forêt et d'utiliser son bois influe considérablement sur le rôle qu'elle peut jouer dans l'atténuation du changement climatique et nombre d'études récentes proposent des stratégies diverses, parfois contradictoires, pour augmenter l'importance de ce rôle. Deux conceptions, principalement, s'opposent. La première, largement inspirée par l'assertion de « neutralité », minimise l'intérêt de la fonction de puits de carbone de la forêt et compte sur des effets bénéfiques de substitution du bois à des combustibles fossiles ou à d'autres matériaux pour réduire globalement les émissions de gaz à effet de serre. La seconde, à l'inverse, met l'accent sur le puits de carbone forestier, donc sur un accroissement de la biomasse forestière et des stocks de carbone qui lui sont liés (nécromasse, carbone du sol...).

Le modèle utilisé pour comparer les deux approches réunit les modèles partiels qui ont servi de support à la description de la dynamique du carbone forestier (figure II-1) et à l'évaluation de l'empreinte carbone des usages du bois (figure III-1), en leur adjoignant une représentation empirique du stockage de carbone dans la litière et le sol qui, à défaut d'une connaissance suffisante des mécanismes de ce stockage, permet, à tout le moins, d'accéder à des ordres de grandeur. Les valeurs de paramètres et les conditions initiales sont tirées, pour la forêt, de l'Inventaire forestier national conduit par l'IGN et, en ce qui concerne les filières d'utilisation du bois, de l'agrégation de données statistiques du Ministère de l'agriculture et de l'alimentation (Agreste) et de quelques autres informations puisées dans la littérature spécialisée. Le modèle d'ensemble reste assez simple et ne prétend pas à l'exactitude dans la description des évolutions des stocks de carbone. Par contre en testant des hypothèses de prélèvement « *toutes choses égales par ailleurs* », il met en évidence, la grande différence d'impact « effet de serre » de l'un et l'autre des deux types de stratégies.

IV-1 Modèle utilisé

Pour accéder à des ordres de grandeur en ce qui concerne les échanges de carbone avec l'atmosphère, la réunion des représentations partielles II-1 et III-1 de la dynamique du carbone « ligneux » dans la forêt et les filières d'utilisation de son bois doit être complétée par une description au moins sommaire des échanges de carbone « non ligneux » avec la litière et le sol forestier. Le contenu carbone de la litière et du sol est en effet au moins équivalent à celui de la biomasse ligneuse et sa variation ne peut être ignorée dans l'évaluation du puits de carbone forestier.

Le compartiment [litière + sol] est alimenté en carbone par une fraction du flux de décomposition de la nécromasse ligneuse et par une partie du flux de renouvellement de la biomasse non ligneuse (feuillage, racines fines, mycéliums des champignons mycorhiziens, végétation herbacée). Si le flux de décomposition de la nécromasse ligneuse peut être assez précisément évalué ($E1$), celui de renouvellement de la biomasse non ligneuse est mal connu et les fractions des deux flux intéressant le stockage de carbone dans la litière et le sol restent indéterminées. Des complications surviennent par ailleurs en raison de la répartition verticale du carbone dans les différents horizons du sol avec des temps de résidence variables et mal définis. Aussi, dans l'état actuel des connaissances, la contribution du compartiment [litière + sol] au puits de carbone, échappe-t-elle encore à une description simple, cohérente avec celles des autres compartiments. À défaut d'évaluation raisonnée, on peut cependant considérer, de manière pragmatique, qu'il y a quelque similitude entre la variation du stock de carbone dans le compartiment [litière + sol] et celle du stock dans la biomasse ligneuse. Cette similitude peut être étroite dans des conditions quasi-statiques d'évolution du système forestier. Une relation linéaire est donc supposée, en première approximation, entre les stocks LS [litière + sol] et Q [biomasse ligneuse] :

$$LS = a + bQ \qquad \text{(IV-1)}$$

Les données de terrain permettent de déterminer aisément les coefficients a et b qui sont ensuite admis invariants comme les autres paramètres (cf. section IV-2-1 h).

Pour les développements ci-après, on s'appuie donc sur le modèle de la figure IV-1. Les formulations pour les flux et stocks sont celles qui sont développées dans les parties I et II pour la forêt et III pour les utilisations des bois récoltés. Les « entrées » du système sont la productivité ligneuse G et le prélèvement annuel P (ou la récolte R). Les « sorties » principales sont les émissions $E1$ (décomposition de la nécromasse), $E2$ (issues de la combustion ou de la décomposition des bois récoltés), $E3$ (annexes, liées notamment à l'exploitation forestière, au transport et à la mise à disposition des bois récoltés, aux traces de gaz à effet de serre autres que le CO_2, à la consommation d'énergie dans l'élaboration des produits bois). Le « puits de carbone » que représentent la forêt et l'utilisation de son bois est quantifié par la somme algébrique :

$$\text{Puits} = G + dLS/dt - E1 - E2 - E3 \qquad \text{(IV-2)}$$

L'empreinte carbone est l'intégrale de ce puits entre l'année origine et l'année présente et correspond à la somme algébrique des variations de stocks de carbone dans les compartiments de

biomasse ligneuse (Q), de nécromasse (N), de produits bois (B) et dans le sol (LS), diminuée de l'intégrale des émissions annexes.

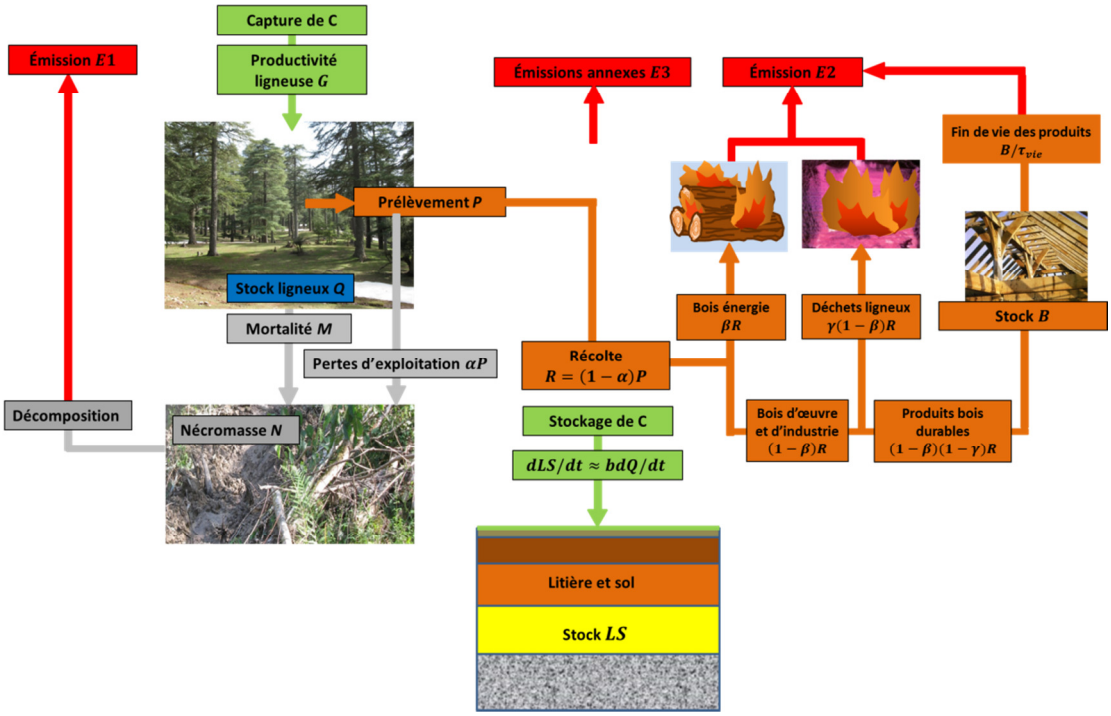


Figure IV-1 – Modèle de la dynamique du carbone dans le système « forêt-bois »

IV-2 Valeurs des paramètres et conditions initiales

IV-2-1 Données sur la forêt

La source principale de données concernant la forêt française métropolitaine est l'Inventaire forestier national (IFN) conduit par l'Institut national de l'information géographique et forestière (IGN).

a) Stock de carbone lié à la biomasse ligneuse (Q_0)

Selon les derniers résultats d'inventaire publiés (IGN 2018), rapportables à l'année 2015 que l'on prendra pour année de référence « 0 », la surface forestière de production en France métropolitaine est d'environ 16 millions d'hectares dont les deux-tiers à dominance feuillue et un-tiers à dominance résineuse. Le volume de bois « fort tige » des arbres sur pied est, avec une faible marge d'erreur, de 2,7 milliards de mètres cubes ($2{,}7\times10^9$ m^3 ou 2,7 km^3) soit, en moyenne, environ 170 m^3/ha. Ce volume se répartit en $1{,}73\times10^9$ m^3 pour les arbres feuillus et $0{,}99\times10^9$ m^3 pour les résineux. Le choix du « volume bois fort tige » comme donnée principale découle de la relative facilité avec laquelle on peut le mesurer à l'aide d'un tarif de cubage propre à chaque essence : ce volume correspond, pour les arbres dits « recensables » (diamètre supérieur à 7,5 cm à 1,3 m de hauteur), à celui de la tige principale depuis le sol jusqu'à un diamètre « fin bout » de 7 cm (IFN 2011b).

Le tableau IV-1 récapitule des valeurs de facteurs d'expansion, infra-densités et proportion massique de carbone souvent utilisées en France pour convertir le volume de bois fort tige des arbres en volumes réels aérien, racinaire, volume de l'arbre entier, puis en contenus carbone. À l'exception de la proportion massique de carbone, ces valeurs sont celles qui ont été proposées dans l'étude « Carbofor » (2004) à partir de mesures sur des échantillons représentatifs des arbres en place. En cohérence avec la composition élémentaire moyenne du bois, on a retenu la valeur 0,5 pour la proportion massique de carbone dans la biomasse ligneuse anhydre (0,475 dans l'étude « Carbofor »).

	FEUILLUS	RÉSINEUX
Facteur d'expansion « branches » (volume aérien ligneux / volume bois fort tige)	1,61	1,33
Facteur d'expansion « racines » (volume ligneux total / volume aérien)	1,28	1,3
Facteur d'expansion global (volume ligneux total / volume bois fort tige)	2,06	1,73
Infra-densité du bois (t/m^3) (masse anhydre / volume du bois vert)	0,55	0,44
Proportion massique de carbone (masse de carbone / masse anhydre du bois)	0,5	0,5
Rapport global (tC/m^3) (masse de carbone / volume de bois fort tige)	0,57	0,38

Tableau IV-1 - Valeurs retenues pour les facteurs d'expansion, infra-densités des bois et contenu carbone des arbres sur pied

Le volume ligneux aérien réel peut donc être évalué à 4,1×10^9 m^3, le volume racinaire à 1,2×10^9 m^3 le volume ligneux total à 5,3×10^9 m^3 (306 m^3/ha) et la masse de carbone contenue dans la biomasse ligneuse des arbres recensables à 1,36 gigatonnes (1,36 GtC) soit, en moyenne, ≈ 85 tC/ha. Ces chiffres ne portent que sur les arbres recensés (diamètre à 1,3 m de hauteur supérieur à 7,5 cm), laissant donc de côté tous les jeunes peuplements par boisement spontané, plantation ou régénération en forêt, ce qui introduit un biais difficile à évaluer mais pouvant être notable (Dupouey et Pignard 2001). On retiendra néanmoins « par défaut » le chiffre de 1,36 GtC pour valeur initiale Q_0 du contenu carbone de la biomasse ligneuse.

b) Productivité biologique ligneuse (G_0)

Selon le même inventaire forestier (IGN 2018) la production annuelle ligneuse est évaluée, en termes de volume bois fort tige des arbres vifs, à 91,5 millions de mètres-cubes par an (91,5x10^6 m^3/an), 53,7x10^6 m^3/an pour les feuillus et 37,8x10^6 m^3/an pour les résineux, valeurs moyennes pour les années 2008 à 2016, rapportables à l'année 2012 (ou années proches) par conséquent. Après conversion en flux de carbone, on retient $G_0 = 45$ millions de tonnes de carbone par an (45 MtC/an) comme valeur de référence (≈ 2,8 tC ha^{-1} an^{-1}) malgré le décalage des années auxquelles se rapportent les données de volumes et de production.

La production non ligneuse est, principalement, celle du carbone des feuilles, racines fines, mycéliums des champignons mycorhiziens, végétation herbacée du sous-bois, etc... Elle ne fait pas l'objet d'inventaire précis mais est du même ordre de grandeur que la production ligneuse (Ciais et

coll. 2008) ou même un peu supérieure (Luyssaert et coll. 2010). Cependant, les composants de la biomasse non ligneuse ont des durées de vie courtes, quelques années tout au plus et, si le flux de carbone transitant est important, le stock constitué demeure négligeable devant celui des éléments ligneux.

c) Flux de carbone lié à la mortalité naturelle (M_0)

Pour l'ensemble de la forêt de production, l'inventaire forestier indique 5,8 Mm^3/an et 3,3 Mm^3/an pour flux de mortalité en volume respectivement pour les feuillus et les résineux. Il s'agit de valeurs moyennes pour la période 2008-2016, rapportables à l'année 2012 ou années proches. On en déduit un flux de carbone $M_0 =$ 4,55 MtC/an entre les compartiments de biomasse ligneuse et de nécromasse.

d) Constante de temps de renouvellement de la biomasse ligneuse (τ)

Cette constante de temps est définie comme le rapport Q/M du stock sur pied à la mortalité (rapport en volume ou en contenu carbone, cf. section I-2). Pour un stock de 1,36 GtC et une mortalité de 4,55 MtC/an, on est conduit à $\tau = 299$ ans, valeur très proche de celles précédemment indiquées dans le tableau I-4 pour les peuplements feuillus et résineux.

Cette valeur de ≈ 300 ans pour constante de temps de renouvellement de la matière ligneuse dans la forêt de production française peut paraître anormalement élevée. Il n'est pas impossible que le prélèvement en forêt, qui n'est pas statistiquement neutre mais porte sur les arbres parmi les plus mûrs, les plus gros, les plus âgés, implique une diminution de la mortalité naturelle par rapport à celle qu'on observerait si le prélèvement était vraiment aléatoire. Ce biais n'a pas de conséquence dans les évolutions prévues par le modèle, tant que les hypothèses de linéarité et d'invariance sont respectées, τ ne jouant qu'un rôle factuel de paramètre dans les équations (cf. section I-2)

e) Prélèvement (P_0), proportion des pertes (α) et récolte (R_0)

L'inventaire forestier national (*loc. cit.*) indique, pour les années 2008 à 2016, des prélèvements moyennés de 22,6x10^6 m^3/an de bois feuillus et 23,8x10^6 m^3/an de bois résineux, 46,4x10^6 m^3/an au total, en volumes « bois fort tige ». Le flux de carbone correspondant, calculé avec les facteurs de conversion du tableau IV-1 est $P_0 =$ 21,9 MtC/an.

Les pertes d'exploitation sont classiquement estimées à 10 % du volume aérien prélevé, soit de 3,6x10^6 m^3/an pour les feuillus, de 3,2x10^6 m^3/an pour les résineux, ce qui correspond à un flux de carbone d'environ 1,7 MtC/an. À ces pertes aériennes il convient d'ajouter celles des souches et racines des arbres exploités qui, dans la majorité des cas, sont laissées en place ; le flux correspondant est de 4,9 MtC/an. Au total, les pertes d'exploitation se situent, en termes de contenu carbone, aux environs de 6,6 MtC/an soit une proportion $\alpha = 0{,}3$ du prélèvement (30 %). Le flux de carbone R_0 lié à la récolte serait donc d'environ 15,3 MtC/an, estimation opérée donc à partir de données « forêt » ; cette valeur est confirmée par les données de commercialisation des bois (cf. section IV-2-2).

On admet que les pertes d'exploitation (αP_0) rejoignent le compartiment nécromasse (cf. figure IV-1). Cela est vrai pour les pertes aériennes et pour la majorité des souches et racines des arbres exploités. Une minorité (essences feuillues surtout) survit néanmoins à la coupe et rejette (taillis) en sorte que l'estimation $\alpha = 0{,}3$ qui est peu contestable pour ce qui est de la récolte, peut paraître surévaluée, vue du compartiment nécromasse. Cependant la biomasse non ligneuse associée aux arbres exploités (feuillage, racines fines, mycéliums des champignons mycorhiziens), la végétation arbustive ou herbacée détruite collatéralement et l'évasion de carbone par perturbation de la litière et des couches superficielles du sol

contribuent aussi à l'émission E_1. Ces contributions sont mal connues mais leur existence même tempère le caractère excessif d'une hypothèse de mortalité à court terme de la totalité des racines des arbres exploités.

f) Stock de carbone lié à la nécromasse ligneuse (N_0)

Les estimations que l'on peut faire pour les stocks de carbone autres que celui du compartiment de bois vif sont beaucoup plus incertaines.

Le volume de bois mort sur pied et chablis inventorié par l'IGN est de 110 millions de mètres cubes (110×10^6 m^3, volume « bois fort tige ») dont environ 65 % de feuillus. Ce bois, pour moitié mort depuis moins de cinq ans, est majoritairement intact ou faiblement décomposé et, en appliquant les mêmes coefficients que pour le bois vif dans l'estimation du contenu carbone, on est conduit à un chiffre de ≈ 55 MtC réparties en ≈ 43 MtC pour la partie aérienne et ≈ 12 MtC pour la partie racinaire.

Le volume de bois mort au sol (volume réel cette fois) serait de 258×10^6 m^3, la part des essences feuillues étant à peu près la même que précédemment. En conservant les valeurs d'infra-densités et de proportion massique de carbone indiquées dans le tableau IV-1, on aboutirait à un stock de 66 MtC ; cependant, une forte proportion de ce bois (80 %) est dans un état de décomposition avancée, ce qui incite à ne retenir, en première estimation, que la moitié de ce chiffre : 33 MtC.

La nécromasse ligneuse comprend également, à tous les stades de décomposition, les racines des arbres morts autres que ceux inventoriés ci-dessus comme « morts sur pied et chablis » ainsi que les racines mortes des arbres exploités, qui sont le plus souvent laissées en place ; le stock de carbone correspondant est incertain mais sans doute considérable. Les taux de mortalité, l'importance des prélèvements et l'ordre de grandeur des constantes de temps de décomposition permettent d'avancer, avec une marge d'incertitude importante, le chiffre médian de 165 MtC pour le contenu carbone des racines des arbres morts ou prélevés, y compris morts sur pied et chablis (Leturcq 2018).

On retient, pour la suite de l'illustration, les chiffres de 76 MtC (43+33) pour le contenu carbone du compartiment « bois mort (aérien) » et 165 MtC pour celui des « racines mortes », soit un total d'environ 240 MtC pour la nécromasse (N_0).

g) Constante de temps de renouvellement de la nécromasse ligneuse (τ_d)

Le compartiment de nécromasse ligneuse est alimenté, d'une part, par le flux de carbone lié à la mortalité naturelle (M_0), d'autre part par celui des pertes d'exploitation (αP_0). Le flux total est donc d'environ 11,1 MtC/an.

Les bois morts sur pied ou au sol ne sont inventoriés de manière systématique que depuis 2008 et l'agrégation des premiers résultats ne montre pas d'évolution significative du stock. Par ailleurs, on ne remarque pas de variation importante du volume des prélèvements ou des récoltes, et par conséquent des pertes d'exploitation, sur près de deux décennies précédant la période 2012-2015 à laquelle peuvent être rapportées les données d'inventaire récentes. On ne dispose d'aucune donnée précise concernant le stock des racines mortes mais on peut supposer que son évolution est en rapport à peu près constant avec celle du bois mort sur pied ou au sol, donc peu notable elle-aussi. Si on se réfère au modèle de compartiment de la figure I-1, on se trouve dans une situation où la variation annuelle dN/dt de la nécromasse est faible comparée aux flux d'entrée ($M_0 + \alpha P_0$) et de

sortie (N_0/τ_d) qui sont, par conséquent, sensiblement égaux. La constante de temps τ_d de renouvellement de la nécromasse peut alors être évaluée par le rapport $N_0/(M_0 + \alpha P_0)$ à 21,6 ans.

h) Stockage de carbone dans la litière et le sol (LS_0)

Selon Meersman et coll. (2012), les sols forestiers français contiennent 95 tC/ha en moyenne soit, au total, LS_0 ≈1,5 GtC, chiffres que confirment d'autres sources, parmi lesquelles le Réseau national de suivi à long terme des écosystèmes forestiers « Rénécofor » (Jonard et coll. 2017). Le contenu carbone de la litière et du sol est donc au moins équivalent à celui de la biomasse ligneuse. Les observations du réseau « Rénécofor » indiquent que le stock de carbone dans la litière et le sol augmente en moyenne de 0,35 tC ha^{-1} an^{-1} sur les sites du réseau soit de 5,6 MtC/an si on rapporte cette valeur à l'ensemble de la forêt française de production (16 millions d'hectares).

Ces indications permettent de déterminer les coefficients de la formule empirique (IV-1). Le stock de carbone Q_0 dans la biomasse ligneuse est évalué plus haut à 1,36 GtC. L'accroissement dQ/dt est la différence entre la production biologique (45 MtC/an), d'une part, la somme du prélèvement (21,9 MtC/an) et de la mortalité (4,55 MtC/an),d'autre part, soit 18,55 MtC/an. Le coefficient b vaut ainsi 5,6/18,55 ≈ 0,302 et, par conséquent a ≈1,09 GtC.

i) Constante de temps d'établissement du couvert forestier (τ_g)

Cette constante de temps caractérise la dynamique d'établissement du couvert d'un peuplement sur la surface qui lui est offerte ou de son rétablissement après coupe partielle ou totale (cf. section I-3). Il n'existe pas de données d'inventaire permettant d'accéder à la valeur de ce paramètre sinon pour des peuplements mono-spécifiques équiennes à partir des tables de production. On retiendra ici $\tau_g = 16$ ans correspondant à la valeur moyenne relevée dans les exemples traités dans la section I-3.

IV-2-2 Paramètres relatifs à l'utilisation des bois récoltés

Pour assurer la cohérence des données relatives, d'une part, à la forêt, d'autre part, à l'utilisation de son bois, on utilise les statistiques « AGRESTE » sur les récoltes des années 2013 à 2017 (Agreste 2014, 2015, 2016, 2017, 2018). Les volumes indiqués sont stables sur cette période, à quelques pour-cent près et, en les moyennant sur la période indiquée, on obtient comme valeur rapportable à l'année 2015 une récolte totale de 60,9 millions de mètres-cubes dont 32,9x10^6 m^3 feuillus, 19,7x10^6 m^3 résineux et 8,3x10^6 m^3 indifférenciés. Le contenu carbone correspondant, calculé avec les coefficients de conversion du tableau IV-1 complété par 0,25 tC/m^3 pour les bois indifférenciés, est de 15,45 MtC. On confirme ainsi le chiffre de 15,3 MtC/an pour la récolte R_0 et, par là, l'importance des pertes d'exploitation ($\alpha \approx 0{,}3$).

La même source « Agreste » permet de préciser un volume de bois énergie annuellement commercialisé de 7,7 x10^6 m^3 auquel il faut ajouter un volume autoconsommé de l'ordre de 23,4x10^6 m^3. En considérant que le bois autoconsommé est principalement feuillu et en appliquant le coefficient 0,25tC/m^3 au bois énergie commercialisé, on évalue à 8,35 MtC/an le flux de carbone lié à la part de récolte directement utilisée pour l'énergie, soit une proportion β ≈0,54 du bois récolté.

Toujours selon la même source, les volumes annuels de bois d'œuvre commercialisés sont de 5,2x10^6 m^3 en feuillus, 13,9x10^6 m^3 en résineux, et correspondent à un flux de carbone de 4,5 MtC/an. Les volumes de bois d'industrie sont, de leur côté, de 4,2x10^6 m^3 en feuillus, 5,7x10^6 m^3 en résineux,

$0,7x10^6$ m^3 en essences indifférenciées, soit un flux de carbone de 2,6 MtC/an. Le flux total lié à la part de récolte destinée à la fabrication de produits bois est ainsi de l'ordre de 7,1 MtC/an.

Il est difficile d'aller plus loin dans le « traçage » des bois récoltés avec le degré de précision maintenu jusque-là. Les données concernant les importations et exportations de bois bruts, de bois sciés, de bois manufacturés ou de déchets de bois sont lacunaires et peu exploitables car souvent exprimées en valeur marchande, non en volume. Des incertitudes subsistent sur les quantités de « connexes de scierie » (dosses, délignures, sciures...) et autres déchets issus des processus de fabrication ou de produits bois en fin de vie, ainsi que sur les proportions de ces déchets qui sont effectivement recyclés. Les stocks de produits bois en usage ou placés en décharge et leur variation annuelle ne sont connus qu'en ordre de grandeur. Aussi les estimations suivantes des flux de carbone dans les filières d'utilisation des bois récoltés sont largement hypothétiques, sans que cela puisse affecter la solidité des résultats finaux concernant l'empreinte carbone de la forêt et de l'utilisation de son bois, en raison de la disproportion des contributions au puits de carbone global de la biomasse forestière (de l'ordre de 20 à 30 MtC/an) et de l'utilisation de la récolte (de l'ordre de 1 MtC/an).

Pour ne pas tomber dans une excessive et inutile complexité, on admet les simplifications suivantes :

- On néglige les balances export-import de bois bruts ou transformés.
- Mise à part la récolte de bois énergie, on ne distingue globalement que deux filières, celle des produits bois d'œuvre (BO) et celle des produits bois d'industrie (BI) et, pour cette dernière, deux sous-filières, « papiers » et « panneaux ».

Par ailleurs, on retient les ordres de grandeur suivants :

- En ce qui concerne la filière « BO », le volume des produits connexes de scierie (dosses, délignures, sciures...) et de deuxième transformation représente de l'ordre de 70 % du volume de bois d'œuvre récolté, et ces produits connexes sont recyclés pour environ un-tiers en trituration (filière de bois d'industrie), le reste étant utilisé pour l'énergie ou des emplois non durables (Agreste *loc. cit.*). Les produits bois d'œuvre en fin de vie sont recyclés pour 40% en bois d'industrie.
- En ce qui concerne la filière « BI », selon des données en pourcentage du Ministère de l'agriculture et de l'alimentation (Agreste *loc. cit.*, MAAF 2014, 2015, 2016, 2017, MAA 2018), environ 70 % de la récolte de bois d'industrie alimente l'industrie papetière, 30% celle des panneaux. L'approvisionnement des industries du papier est constitué pour 70% de bois récolté et 30 % de déchets connexes de scierie; en outre, les deux-tiers de la production totale de papiers et cartons est recyclée (COPACEL 2018). L'approvisionnement des industries du panneau est constitué pour 50 % de bois récolté, 30 % de déchets connexes de scierie, 20 % de bois recyclés.
- Le stock de carbone dans les produits bois en usage est insuffisamment renseigné. Selon de rares sources (FCBA 2012, Deroubaix et coll. 2012, Deroubaix 2017) il serait en légère augmentation, passant de 84,5 MtC en 2005 à 92,7 MtC en 2013. Ces chiffres incluent le bois énergie en attente de combustion pour environ 15 % (FCBA 2012) et on retiendra donc une estimation de 80 MtC pour les produits bois d'œuvre et d'industrie. La variation annuelle du

stock, estimée à 1,25 MtC/an en 2005, est révisée à 0,7 MtC/an pour 2013 (Deroubaix 2017). Cette valeur est très incertaine, et on pourrait, de fait, la considérer comme négligeable ; on la retient cependant pour mieux illustrer la prise en compte du stockage de carbone dans les produits bois. Au stock des produits en usage, il conviendrait d'ajouter celui des déchets et produits bois placés en décharge en fin de vie, stock probablement comparable ou supérieur mais pour lequel on ne dispose d'aucune donnée sûre. On admet, « par défaut », que ce dernier stock est invariable.

- Les contenus carbone des produits finis sont, en ordre de grandeur, pour l'année de référence (2015) : 3 MtC/an pour les papiers et cartons (7,9 Mt à 0,38 tC/t, COPACEL 2018) et 1,25 MtC/an pour les panneaux (5,5 millions de mètres cubes à 0,225 tC/m^3, MAAF 2016)

Dans ces conditions, les flux de carbone dans les filières d'utilisation du bois à partir de la récolte en forêt peuvent être schématisés comme le montre la figure IV-2, en gardant en mémoire la part liée à l'utilisation directe de bois pour l'énergie (8,35 MtC/an).

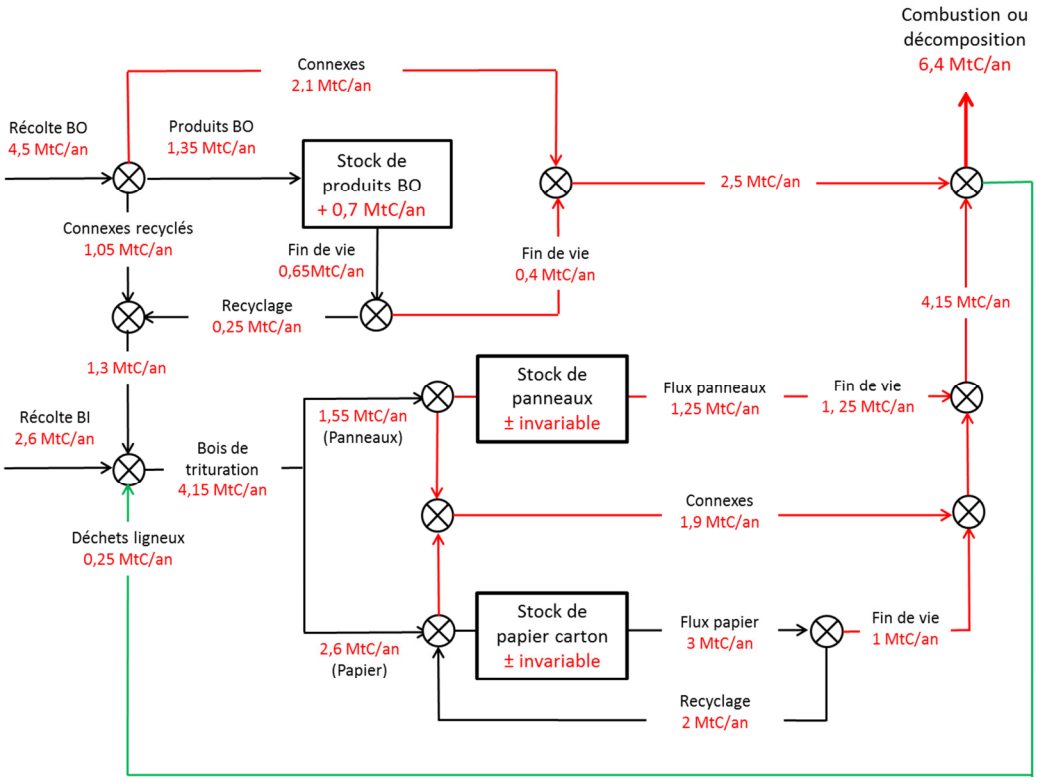


Figure IV-2 – Représentation schématique des flux de carbone dans les filières d'utilisation des bois.
Les valeurs de flux indiquées ne doivent être considérées que dans leur ordre de grandeur. Leur apparente précision répond au souci de cohérence entre flux entrants, flux sortants et variations des stocks (principe de conservation).

Du flux de carbone associé à la récolte de bois d'œuvre et d'industrie (7,1 MtC/an), une très faible et incertaine part de 0,7 MtC/an correspond à une accumulation de carbone dans les produits bois en usage. La plus grande part (6,4 MtC/an) est renvoyée dans l'atmosphère par décomposition ou combustion. De ces 6,4 MtC/an, 2,65 MtC/an sont liées aux produits bois non recyclés en fin de vie et 3,75 MtC/an à des déchets de fabrication également non recyclés. On chiffrera donc le paramètre γ à 3,75/7,1 ≈ 0,53. Pour un stock de produits bois en usage de l'ordre de 80 MtC, le paramètre τ_{vie} est, globalement, 80/2,65 ≈ 30 ans.

Les valeurs des paramètres γ, τ_{vie} sont assez différentes de celles qui avaient été avancées dans une précédente version de l'étude (Leturcq 2018 : $\gamma = 0{,}68$, $\tau_{vie} = 45$ ans). Cela est dû à des différences de données pour les années de référence 2010 (étude de 2018) et 2015 (présente étude) mais surtout aux incertitudes relatives, d'une part, au stock de carbone dans les produits bois en usage et à sa variation annuelle, d'autre part, à la ventilation des déchets non recyclés entre déchets de fabrication proprement dits (γ) et produits bois en fin de vie (τ_{vie}). En raison de la faible valeur de la variation de stock et parce que tous les déchets non recyclés sont voués à combustion ou décomposition, ces incertitudes affectent peu l'intensité de l'émission E2 qui, rapportée au contenu carbone de la récolte, était estimée à 0,934 tC/tC dans la précédente étude et l'est à 0,954 tC/tC dans la présente. Dans les conditions actuelles, on doit considérer que le carbone de la récolte est, de fait, renvoyé en quasi-totalité dans l'atmosphère.

IV-2-3 Emissions annexes

Les émissions annexes (ou extrinsèques) comprennent (a) les émissions dites « amont » qui sont liées à toutes les opérations qui vont de l'abattage des arbres à la mise à disposition des bois récoltés (exploitation, transport, conditionnement, commercialisation...) (b) les émissions, à la combustion du bois, de petites quantités d'autres gaz à effet de serre que le dioxyde de carbone, notamment du méthane (c) les émissions « grises » liées aux processus de fabrication des produits.

a) Les émissions amont se rapportent à l'ensemble de la récolte. En termes d'équivalent carbone, elles sont estimées à quelques pour-cent du contenu carbone de la récolte. Dans la « Base carbone » de l'ADEME (2016), on indique, pour le bois à 20 % d'humidité, une émission amont de 0,041 $kgCO_{2eq}$/kg, ce qui correspond à une fraction $k_{amont} = 0{,}028$ tC_{eq} par tonne de contenu carbone de la récolte, chiffre qu'on retient jusqu'à meilleure information.

b) Les émissions par combustion d'autres gaz à effet de serre que le CO_2 concernent la part de récolte directement utilisée pour l'énergie mais aussi tous les déchets de bois et produits en bois de vie non recyclés qui servent eux-mêmes de combustible. La base carbone de l'ADEME propose, pour le bois à 20 % d'humidité, une valeur de 0,073 $kgCO_{2eq}$/kg correspondant à une fraction $k_{excès} = 0{,}05$ tC_{eq} par tonne de carbone émise par le bois consumé. Les déchets de bois et produits en fin de vie placés en décharge émettent eux-mêmes par décomposition du CO_2 et du méthane, dans des proportions sans doute différentes que par combustion mais qui restent mal documentées. Faute d'information précise, la même valeur de 0,05 tCeq/tC est retenue pour l'ensemble des bois consumés ou décomposés.

c) Les émissions « grises » globales des filières bois d'œuvre et d'industrie ne sont pas directement renseignées. Selon l'INSEE (Ecoiffié 2017), l'intensité carbone était, en 2015, de 1,2 tCO_2/tep. Toujours selon l'INSEE (2017), la consommation d'énergie du secteur industriel « bois, papier et imprimerie » se serait élevée, toujours en 2015, à 3850 ktep. En accordant foi à ces chiffres, l'émission de ce secteur serait 4,6 $MtCO_2$ ou 1,25 MtC. Pour un approvisionnement en bois d'œuvre et d'industrie chiffré, en contenu carbone, à 7,1 MtC, la proportion k_{grises} est de 0,17.

Les incertitudes qui pèsent sur ces facteurs k d'émissions annexes sont importantes mais n'ont que peu d'impact sur les résultats finaux en raison de la disproportion d'ordre de grandeur de ces émissions annexes ($E3$) vis-à-vis des émissions principales ($E1$ et $E2$, cf. figure IV-1).

IV-3 Un scénario « au fil de l'eau »

Pour apprécier concrètement l'impact « effet de serre » de diverses options de prélèvement et d'utilisation des récoltes, il est commode de disposer d'un scénario de référence pour l'évolution possible sinon probable de la forêt française au fil du temps. Le plus simple est de prendre, pour condition initiale, l'état de la forêt qui a été assez précisément défini pour l'année 2015 dans la section précédente et de dérouler le scénario sur la base du modèle de la figure IV-1 en maintenant constants le prélèvement, la production biologique, et tous les paramètres (valeurs récapitulées dans le tableau IV-1). Ce scénario de référence est dit « au fil de l'eau ». On limite la perspective à l'année 2050 qui doit marquer une étape cruciale dans la réduction des émissions de gaz à effet de serre.

Stocks de carbone initiaux	Biomasse ligneuse Q_0	1360 MtC
	Nécromasse ligneuse N_0	240 MtC
	Litière et sol LS_0	1500 MtC
	Produits bois B_0	80 MtC
	Stockage dans la litière et le sol $dLS/dt\|_0$	5,6 MtC/an
Constantes de temps	Renouvellement de la biomasse ligneuse τ	299 ans
	Décomposition de la nécromasse τ_d	21,6 ans
	Rétablissement du couvert forestier τ_g	16 ans
	Durée de vie des produits bois τ_{vie}	30 ans
Utilisation des bois récoltés	Bois énergie/récolte β	0,54
	Déchets de fabrication/ bois utilisé γ	0,53
Émissions annexes	Émissions amont k_{amont}	0,028
	Émissions combustion autres que CO_2 $k_{excès}$	0,05
	Émissions grises k_{grises}	0,17
Production et prélèvement	Production biologique ligneuse G_0	45 MtC/an
	Prélèvement ligneux P_0	21,9 MtC/an
	Proportion de pertes d'exploitation α	0,3

Tableau IV-1 – Conditions initiales, paramètres et contraintes pour un scénario « au fil de l'eau »

Les évolutions des stocks de carbone dans les différents compartiments, du puits et de l'empreinte carbone sont représentées graphiquement sur les figures IV-3 et IV-4 sur la base des formulations présentées dans les sections II-1 et III-1. Sur un intervalle de temps aussi court (35 ans), les effets dynamiques liés aux constantes de temps τ, τ_{vie}, et même τ_d restent peu visibles en sorte qu'on pourrait obtenir arithmétiquement, sans effort, de bonnes estimations.

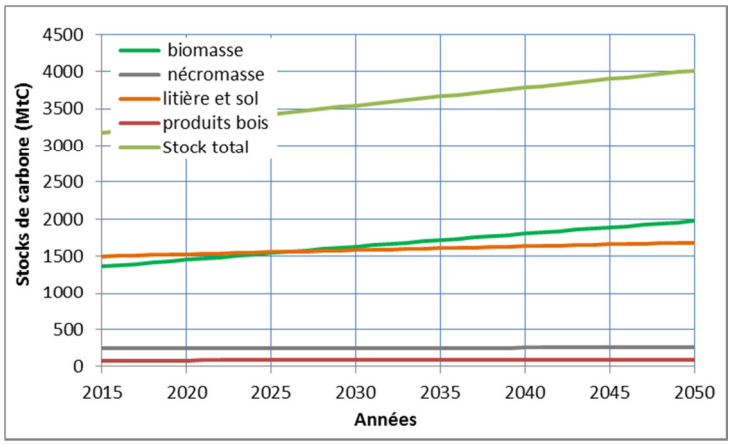
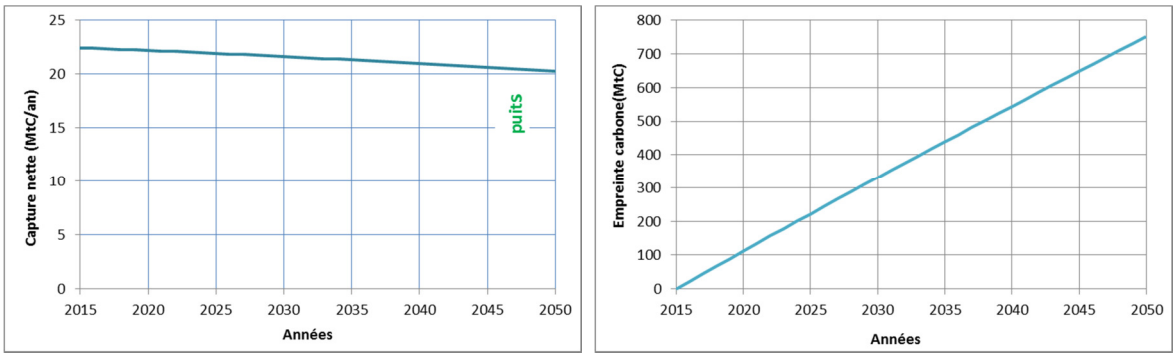


Figure IV-3 – Évolutions des stocks de carbone (scénario « au fil de l'eau)

Il convient de souligner le faible poids des compartiments « nécromasse » et « produits bois » relativement à ceux de biomasse ligneuse et litière + sol, non seulement pour ce qui est des stocks mais aussi de leur variation. Les accroissement des stocks sont, à l'origine (2015) : 18,55 MtC/an pour la biomasse ligneuse, correspondant à la différence entre production biologique brute (45 MtC/an), d'une part, la somme du prélèvement (21,9 MtC/an) et de la mortalité (4,55 MtC/an), d'autre part ; 5,6 MtC/an pour le compartiment [litière + sol], donnée de terrain ; l'accroissement est relativement faible pour les produits bois (≈ 0,7 MtC/an) et négligeable pour la nécromasse suivant les inventaires. Le puits de carbone que représente la forêt et les utilisations de son bois en 2015 se chiffre donc à 24,8 MtC/an, hors émissions annexes, 22,4 MtC en prenant en compte ces dernières (≈ 2,4 MtC/an).

Sous réserve d'invariance des paramètres, on obtiendrait, en 2050, un stock de carbone dans la biomasse ligneuse nettement plus élevé (+ 613 MtC), le stock dans la litière et le sol augmentant aussi, dans une moindre proportion (+ 185 MtC), les stocks dans les autres compartiments n'étant que peu modifiés (nécromasse : + 23 MtC, produits bois : + 13 MtC). Entre 2015 et 2050, le stock total de carbone dans la forêt française (hors produits bois) passerait ainsi de 3,1 GtC à 3,92 GtC (+ 821 MtC). En incluant le stock des produits bois, l'augmentation serait de 834 MtC.

Au fur et à mesure que les années passent, les accroissements annuels de stocks se réduisent en raison, principalement, de la mortalité qui augmente proportionnellement à la biomasse ligneuse, et s'élèverait, en termes de flux de carbone, à 6,6 MtC/an vers 2050. Au terme de la période considérée, l'accroissement annuel du stock dans la biomasse ligneuse s'abaisse à 16,5 MtC/an. Le stock de carbone « nécromasse » est alors en croissance de 1 MtC/an en conséquence de l'augmentation du flux de mortalité qui l'alimente. L'accroissement du stock dans la litière et le sol se réduit en proportion de celui du stock ligneux et n'est plus que de 5 MtC/an et celui du stock de carbone dans les produits bois devient peu significatif à 0,2 MtC/an. Le puits de carbone se chiffrerait à 20,3 MtC/an en 2050, compte tenu des émissions annexes qui sont pratiquement inchangées.



(a) (b)

Figure IV-4 – Évolutions du puits de carbone (a) et de l'empreinte carbone (b) dans le scénario « au fil de l'eau »

L'évolution du puits de carbone c'est-à-dire de la capture nette de carbone dans l'atmosphère, est représentée sur la figure IV-4 (a). Rappelons que, si l'on fait abstraction des émissions annexes,

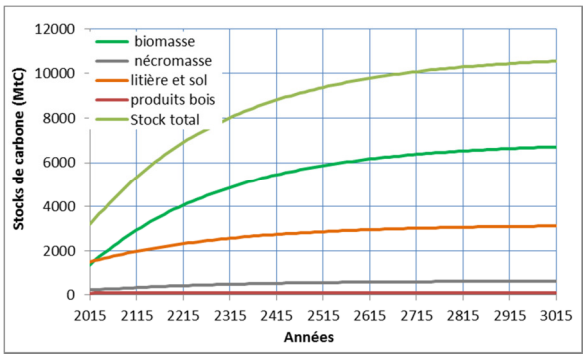
l'intensité du puits est égale à la dérivée de la variation du stock total de carbone. La période considérée (35 ans) est courte devant la constante de temps principale attachée à la biomasse ligneuse (≈ 300 ans) et l'évolution du puits apparaît quasi-linéaire de 22,4 MtC/an à 20,3 MtC/an. Il lui correspond, par intégration, celle de l'empreinte carbone, représentée sur la figure IV-4 b. L'empreinte est ici positive, selon la convention de signe naturelle : capture (+), émission (-). Elle est égale, comme le veut le principe de conservation, à la variation du stock total de carbone dans le système par rapport à l'année origine, soit 834 MtC en 2050, diminuée de l'intégrale des émissions annexes, qui sont extérieures au système, et dont la valeur est sensiblement 2,4×35 = 84 MtC. L'empreinte effective est, sur la période, de 751 MtC.

Le puits de carbone est moins important que celui déterminé, pour l'année de référence 2010, à près de 30 MtC, hors émissions annexes (Leturcq 2018). L'explication réside dans la prise en compte de ces émissions annexes (2,4 MtC/an), dans des données de stockage un peu différentes et dans une nette augmentation des prélèvements de 19,6 MtC pour 2010 à 21,9 MtC pour 2015 (+2,3 MtC/an). Par ailleurs, on a négligé ici le stockage de carbone dans les compartiments secondaires de biomasse non ligneuse (feuillage, racines fines, végétation herbacée ou arbustive du sous-bois).

La précision apparente avec laquelle sont donnés les résultats ne doit pas faire illusion ; elle répond au souci de cohérence arithmétique. Le modèle, volontairement simplifié, ne retient que l'essentiel des échanges de carbone entre compartiments et avec l'atmosphère, et, en ce qui concerne la représentation de la litière et du sol, n'est qu'un pis-aller dans l'état actuel des connaissances. Les résultats ne doivent donc être considérés que dans leurs ordres de grandeur.

Malgré les incertitudes, le scénario « au fil de l'eau » semble garantir, jusqu'en 2050 et probablement au-delà, un puits de carbone de l'ordre de 20 MtC/an soit presque 75 $MtCO_2$/an. Cette valeur de puits représente près de 25 % des émissions actuelles (nettes) de dioxyde de carbone (310 $MtCO_2$/an en 2017) et encore 17 % du total des émissions nationales de gaz à effet de serre [439 $MtCO_{2eq}$/an selon les chiffres du CITEPA (2019)].

Et après 2050 ? Si l'on prolongeait le scénario à production biologique et prélèvement constants bien au-delà de l'année 2050, on approcherait d'un état d'équilibre théorique, les stocks de carbone dans les différents compartiments tendant asymptotiquement vers des valeurs constantes, avec annulation corrélative des contributions correspondantes au puits de carbone (cf. figure ci-après). Il est facile de préciser l'état d'équilibre qui est défini, pour le bois vif, par une mortalité annuelle égale à la différence entre production brute et prélèvement (accroissement nul), les flux d'entrée et de sortie devenant égaux pour chacun des autres compartiments ($\approx Q/\tau$). On détermine ainsi un stock asymptotique de carbone de 10,8 GtC dont 6,9 GtC dans le seul bois vif pour un volume « bois fort tige » sur pied de $13{,}8\times10^9$ m^3, soit, en densité pour une surface forestière supposée inchangée de 16 millions d'hectares, un stock de 675 tC/ha dont 430 tC/ha pour le bois vif avec un volume « bois fort tige » de ≈ 860 m^3/ha.



Évolutions théoriques à long terme des stocks de carbone dans un scénario « au fil de l'eau »

Ces chiffres qui ne peuvent être approchés qu'après de nombreux siècles en raison de la valeur élevée de la constante de temps τ, frappent par les ordres de grandeur en masse, volume et durée, mais n'ont qu'une valeur illustrative, l'invariance de la production biologique, du prélèvement, et des constantes de temps caractéristiques (dont celle, τ, liée à la mortalité) étant peu vraisemblable sur une telle durée. Cependant, Pregitzer et Euskirchen (2004) estiment à environ 500 t/ha la masse moyenne de carbone dans les écosystèmes forestiers du domaine tempéré pour une classe d'âge des peuplements de 120 à 200 ans (soit 8 GtC pour une surface forestière comme celle de la France), valeur plus élevée encore que celle qu'indique le scénario « au fil de l'eau » en laissant s'écouler un laps de temps comparable. Ceci donne une idée de la « réserve potentielle » de capture de carbone par la forêt française, plusieurs gigatonnes assurément, sous réserve de ne pas obérer l'accroissement ligneux par des prélèvements injustifiés.

IV-4 Un scénario de croissance des prélèvements sur la période 2015-2050

La prégnance de l'assertion de « neutralité carbone » de la forêt et des bois qu'elle produit oriente naturellement les politiques de lutte contre le changement climatique, non vers une l'amélioration du puits de carbone forestier (l'existence même d'un puits de carbone contredit l'assertion de neutralité, celle-ci étant fondée sur une hypothèse de cycle de carbone « biogénique » équilibré), mais bien vers une augmentation du prélèvement pour des substitutions de bois à des combustibles fossiles et des matériaux énergivores, substitutions jugées *a priori* bénéfiques. Ainsi, le Plan national forêt-bois (PNFB 2016) a pour objectif une augmentation de récolte de bois commercialisé de 12 millions de mètres-cubes sur la période 2016-2026 et tous les exercices de prospective autour de la loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte (2015) envisagent, au-delà du terme de ce plan, une croissance du prélèvement importante, à l'exemple des scénarios « INRA » (Roux et coll. 2017) qui portent sur des augmentations de 50 ou 80 % en 2050 par rapport à 2015.

Le scénario de croissance des prélèvements déroulé ci-après s'inspire de ces pourcentages d'augmentation, sans modification des usages des bois récoltés, c'est-à-dire en conservant la répartition actuelle entre bois énergie d'une part, bois d'œuvre et d'industrie d'autre part. Tous les paramètres sont maintenus constants, ce qui reste discutable, notamment pour la production biologique ligneuse et la mortalité (constante de temps τ), mais admissible en l'absence d'indications sûres en ce qui concerne leur variation dans le temps, dans un sens ou dans l'autre.

a) Hypothèse d'une augmentation progressive de 50% du prélèvement (ou de la récolte).

En répartissant linéairement l'augmentation sur les 35 années de la période 2015-2050, le prélèvement croît de 0,66x10^6 m^3/an^2 en volume bois fort tige, soit 0,31 MtC/an^2 en termes de contenu carbone, passant ainsi de 46,4x10^6 m^3/an (21,9 MtC/an) en 2015 à 69,6 x10^6 m^3/an (32,85 MtC) en 2050.

Dans la mesure où la production biologique ne serait pas sensiblement affectée par le changement de rythme d'exploitation, les stocks de carbone dans les différents compartiments évolueraient alors comme l'indique la figure IV-5.

Par rapport à ce qu'on observe dans le scénario « au fil de l'eau », les variations de stock sur la période sont sensiblement modifiées : de moindre amplitude pour les stocks « biomasse ligneuse » (+ 428 MtC) et « litière +sol » (+ 129 MtC), elles sont augmentées pour les stocks « nécromasse » (+ 54 MtC) et « produits bois » (+34 MtC) comme cela est attendu d'une croissance de prélèvement (ou de récolte). L'augmentation du stock total de carbone est donc de 645 MtC contre 834 MtC dans le scénario au fil de l'eau.

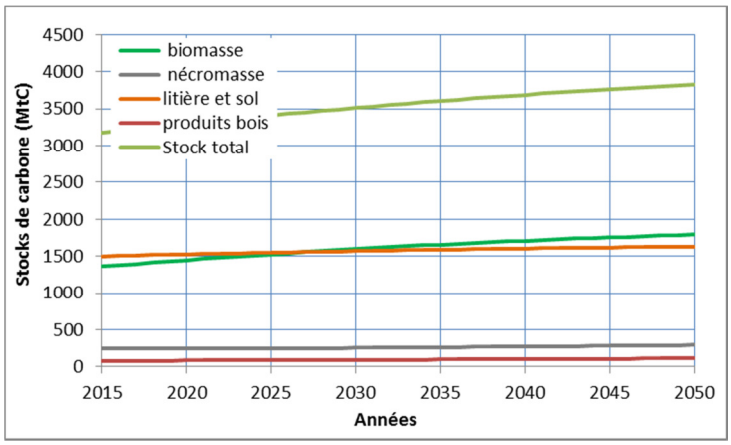
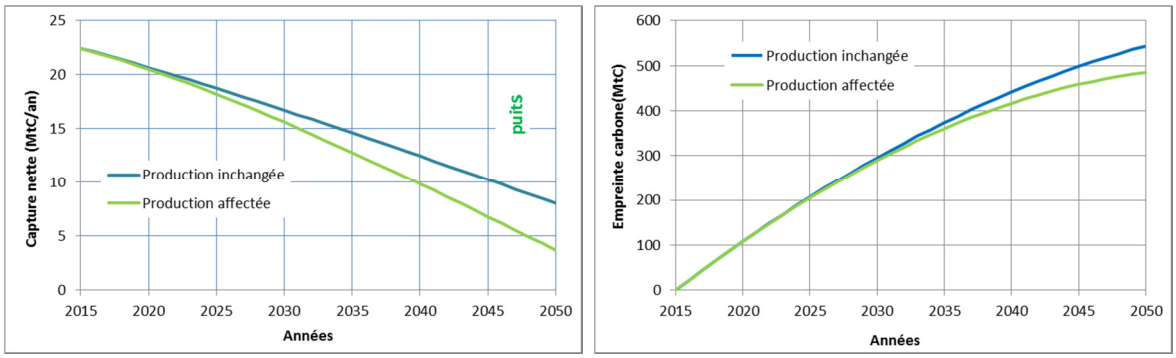


Figure IV-5 – Évolutions des stocks de carbone
(Scénario d'augmentation de 50% du prélèvement sur la période 2015-2050)

La variation du puits de carbone est représentée sur la figure IV-6 (a) (courbe bleue). Le puits n'est plus que de 7,9 MtC/an en 2050, réduit donc de 12,4 MtC/an par rapport au scénario « au fil de l'eau ». L'ampleur de cette réduction s'explique aisément. Le prélèvement, étant augmenté de 10,9 MtC/an et s'exerçant sur la biomasse ligneuse, la contribution au puits de cette biomasse est diminuée pratiquement d'autant (- 10,3 MtC/an), l'écart provenant d'une légère variation de la mortalité (+ 0,6 MtC/an). La contribution de la litière et du sol qu'on a, faute de mieux, lié ici arithmétiquement à celle de la biomasse ligneuse (cf. expression I-1) est elle-même en diminution de 3,1 MtC/an pour un coefficient de proportionnalité b =0,3. Les émissions annexes sont accrues de 50 % comme le prélèvement, soit de 1,1 MtC/an. Par contre, les stockages de carbone dans la nécromasse et dans les produits bois augmentent quelque peu, de 1,2 MtC/an et 1 MtC/an respectivement) en raison de pertes d'exploitation et d'une production accrues. On a bien : - 10,3 - 3,1 - 1,1 + 1,2 +1 = - 12,4 MtC/an, aux erreurs d'arrondi près.



(a) (b)

Figure IV-6 – Évolutions du puits de carbone (a) et de l'empreinte carbone (b)
(Scénario d'augmentation de 50% du prélèvement sur la période 2015-2050)

L'empreinte carbone est de 542 MtC en 2050, en diminution de 209 MtC par rapport à celle obtenue dans le scénario au fil de l'eau. Ces 209 MtC représentent l'empreinte ou « coût » carbone du surplus de récolte et de son utilisation pour la période considérée (et pour cette période seulement, les effets de l'augmentation de prélèvement se prolongeant sur une durée théoriquement infinie, en

pratique quelques unités de la constante de temps τ, soit de nombreux siècles, cf. deuxième partie du document). Le contenu carbone des prélèvements supplémentaires effectués sur la période par rapport au scénario de référence « au fil de l'eau » étant de 192 MtC, celui de la récolte correspondante est de 134 MtC ($\alpha = 0{,}3$). D'où une empreinte unitaire de 1,55 tC par tonne de contenu carbone du bois récolté, soit 2,85 tCO_2 par tonne de bois sec (anhydre) ou encore 1,46 tonne de CO_2 par mètre-cube réel.

En réalité, le coût carbone du supplément de récolte peut être nettement plus élevé que ce qu'on vient d'estimer. En effet l'augmentation des coupes, si elles sont pratiquées « en plein », implique une diminution de production biologique brute par réduction transitoire du couvert forestier. En admettant que le rétablissement du couvert s'effectue selon une dynamique caractérisée par une constante de temps unique $\tau_g = 16$ ans comme indiqué dans IV-2-1 i), on est conduit aux variations de puits de carbone et d'empreinte surimposées en vert dans la figure IV-6. Les variations de stock se distinguent peu, à simple vue, de celles qui sont représentées sur la figure IV-5. À titre indicatif, le « coût carbone » s'élèverait ici à 268 MtC (2 tC/tC ou 3,66 tCO_2/t sèche ou 1,88 tCO_2/m^3 réel)

b) Hypothèse d'une augmentation progressive de 80% du prélèvement (ou de la récolte).

Cette hypothèse, retenue dans plusieurs exercices de prospective (Roux et coll. 2017, négaWatt 2017,...) repose sur l'idée que l'on pourrait, sans obstacle majeur, augmenter le taux de prélèvement jusqu'à 100% de la production biologique nette. Pour l'année de référence (2015), le taux de prélèvement se chiffre à 54 % de la production (production brute : 45 MtC/an, mortalité : 4,45 MtC/an, prélèvement 21,9 MtC/an) et approcherait effectivement le taux limite pour une augmentation de 80% (97 %). Un tel taux de prélèvement est évidemment illusoire : une part non négligeable de la forêt française (30 % en surface) n'est pas exploitable pour des raisons de difficultés techniques (accessibilité, accidents de terrain,...), de structure de la propriété forestière (morcellement, motivation des « petits » propriétaires,...) ou d'objectifs autres que la production de bois (protection des sols, des eaux, de la biodiversité,...). Il en résulte que là où elle est exploitée, la forêt française subit déjà probablement des prélèvements qui peuvent localement approcher ou dépasser la production biologique.

En admettant quand même réalisable une augmentation de prélèvement de 80% entre l'année de référence 2015 et 2050, c'est-à-dire de $46{,}4 \times 10^6$ m^3/an (21,9 MtC/an) à $83{,}5 \times 10^6$ m^3/an (39,4 MtC/an), soit une croissance de $1{,}06 \times 10^6$ m^3/an^2 en volume bois fort tige ou 0,5 MtC/an^2 en termes de contenu carbone, et toujours en supposant inchangée la production biologique brute, on obtiendrait les évolutions des stocks, puits et empreinte carbone représentées sur les figures IV-7 et IV-8.

Les variations des stocks sont évidemment de moindre amplitude que dans les cas précédents (les pentes tendent vers l'annulation au terme de la période considérée), ce qui signifie que le puits de carbone finit par s'évanouir, ainsi qu'on pouvait le prévoir. L'empreinte carbone en 2050 n'est plus que de 417 MtC, en diminution de 334 MtC par rapport à celle observée dans le scénario « au fil de l'eau ». Le contenu carbone du supplément de récolte étant 215 MtC le « coût carbone » unitaire de la récolte est le même que précédemment (1,55 tC/tC ou encore 1,46 tCO_2/m^3 réel).

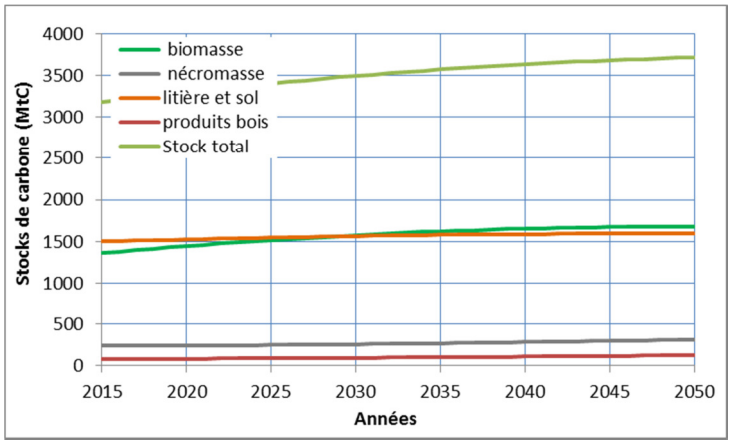
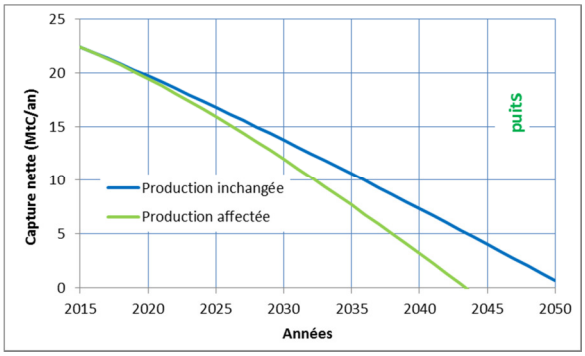
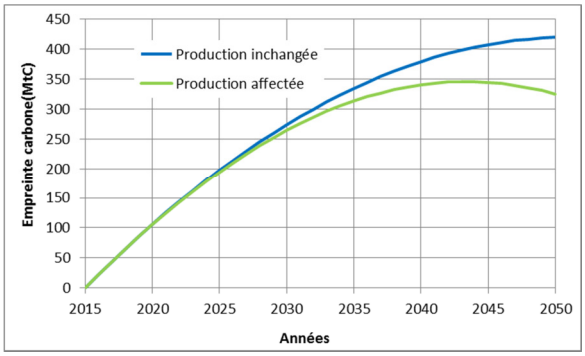


Figure IV-7 – Évolutions des stocks de carbone
(Scénario d'augmentation de 80% du prélèvement sur la période 2015-2050)

Si l'on tient compte de l'impact des prélèvements sur la production biologique, les évolutions du puits de carbone et de l'empreinte sont nettement modifiées (cf. figure IV-8). Le puits de carbone s'annule vers 2043 et change de signe : le système forêt-bois devient source de carbone vis-à-vis de l'atmosphère. Corrélativement, l'empreinte carbone après avoir atteint un maximum au moment où le puits change de signe, décroît significativement. Le coût carbone, dans ces conditions, s'élève à 429 MtC soit la même valeur relative, 2 tC/tC ou 1,88 $tCO2/m^3$ réel, que celle obtenue dans l'hypothèse d'une augmentation du prélèvement de 50%. Cette invariance est la conséquence de l'approximation de linéarité qui est à la base du modèle.



(a)



(b)

Figure IV-8 – Évolutions du puits de carbone (a) et de l'empreinte carbone (b)
(Scénario d'augmentation de 80% du prélèvement sur la période 2015-2050)

IV-5 Substitution vs. puits de carbone

Les exemples précédents mettent bien en évidence qu'une augmentation de prélèvement implique inévitablement une diminution du puits de carbone forestier et que, même si l'on tient compte d'une possibilité de stockage hors forêt dans des produits bois durables, le « coût carbone » du bois récolté peut être sensiblement supérieur à son contenu. On est bien loin de la neutralité !

Dans la mesure où l'approximation linéaire s'applique au système forêt-bois, le coût carbone relatif est indépendant des volumes récoltés, toutes choses égales par ailleurs. Il dépend par contre de

l'intervalle de temps sur lequel on effectue le prélèvement et sur lequel on intègre la capture de carbone par la forêt et l'ensemble des émissions afférentes à la récolte et à son emploi. Il dépend aussi de l'utilisation des bois, dans une faible mesure, en relation avec des variations d'émissions annexes (grises notamment) et de stockage dans les produits bois. Ainsi, dans les scénarios précédents, le « coût » relatif du supplément de récolte sur la période 2015-2050 serait de 1,64 tC/tC si l'entière récolte était utilisée pour l'énergie et de 1,46 tC/tC si elle n'alimentait que les filières de bois d'œuvre et d'industrie (chiffres portés à 2,08 tC/tC et 1,9 tC/tC respectivement si la production biologique est affectée par le prélèvement). Dans ces conditions, si l'objectif de réduction des émissions de gaz à effet de serre est tenu pour prioritaire, une augmentation de récolte de bois ne pourrait se justifier que par des effets de substitution favorables vis-à-vis d'autres combustibles ou d'autres matériaux. Le critère à retenir est simple : pour une même quantité d'énergie rendue (substitution « énergie »), une même fonction et une même durée d'usage (substitution « matériau »), il suffit de comparer les coûts carbone de l'option « bois » et de l'option alternative, et de choisir la moins « chère ». Mais, bien sûr, l'éventuel bénéfice ne doit être comptabilisé que si la substitution est réalisée, ou, à tout le moins dans un exercice de prospective, réalisable.

Les premières conclusions relatives aux substitutions, avancées dans la troisième partie du document peuvent alors être précisées pour les scénarios précédents d'accroissement des prélèvements en forêt de production française.

a) Substitution énergétique – Pour les bois français anhydres, le pouvoir calorifique inférieur (PCI) est, en moyenne pondérée, de 18,5 gigajoules par tonne (18,5 GJ/t) et comme une tonne de bois sec (anhydre) contient sensiblement 0,5 tonne de carbone, le facteur d'émission intrinsèque du bois est bien de 0,5/18,5 = 0,027 tC/GJ ou 0,099 tCO2/GJ, non « zéro » comme l'affiche nombre des tenants des bioénergies. Le coût carbone moyen de la récolte destinée à l'énergie sur la période 2015 -2050, en tenant compte des émissions annexes et de la diminution du puits de carbone forestier qu'implique le prélèvement varie de 1,64 tC/tC à 2,08 tC/tC selon l'importance de la perturbation apportée à la production biologique par l'exploitation. Le facteur d'émission apparent (ou effectif) du bois combustible est donc, pour cette récolte, de l'ordre de 0,16 à 0,21 tCO_2/GJ. Le tableau IV-2 récapitule les valeurs de facteurs d'émission des principaux combustibles mettant en évidence que, pour la même quantité de chaleur produite, l'émission de dioxyde de carbone par le bois est approximativement trois fois plus élevée que celle du gaz naturel, deux fois celle du pétrole et encore une fois et demie celle du charbon.

Source d'énergie	Émission intrinsèque (tCO_2/GJ)	Émissions annexes (tCO_{2eq}/GJ)	Émission effective (tCO_{2eq}/GJ)
Bois (anhydre)	0,099	0,008	0,16 à 0,21 **
Charbon aggloméré	0,098	0,010	0,108
Pétrole brut	0,073	0,007	0,080
Gaz naturel	0,056	0,012	0,068
Electricité *			0,02

*« Mix » des sources françaises d'électricité

** Compte tenu de l'affaiblissement du puits de carbone forestier corrélatif du prélèvement

Tableau III-2 – Valeurs-types des émissions de carbone rapportées à l'énergie produite pour le bois et autres sources

Valeurs empruntées à la « base carbone » de l'ADEME, sauf pour le bois.

Même si le coût carbone net du combustible bois est allégé par la prise en compte de l'émission « évitée » des combustibles fossiles substitués, charbon par exemple, l'argument selon lequel le bois énergie serait « bon pour le climat » doit être rejeté.

b) Substitution matériau – En ce qui concerne la substitution « matériau », les choses sont moins nettes. Il ne fait pas de doute que des produits bois peuvent avantageusement remplacer, dans le secteur de la construction notamment, des éléments réalisés avec des matériaux énergivores tels que le fer, l'acier, l'aluminium ou le béton. Les analyses de cycle de vie (ACV) devraient permettre, cas par cas, de déterminer l'avantage « effet de serre » d'une substitution, dans un sens ou dans l'autre. Malheureusement, la plupart des auteurs qui s'efforcent de justifier des augmentations de récolte au nom de la lutte contre le changement climatique, estiment les réductions d'émission permises à l'aide de coefficients, plus ou moins globalisés par type de produits, rapportant au mètre cube de bois mis en jeu la masse de CO_2 « évitée ». Par exemple, des coefficients de 1,1 à 1,6 tonne de CO_2 évitée par mètre cube de produits bois (ADEME 2015, Dhôte et coll. 2016, Roux et coll. 2017) ont été récemment proposés. Or, les valeurs des coefficients de substitution sont déduites d'analyses de cycle de vie de produits généralement conduites dans le cadre de l'assertion de « neutralité » en sorte que les « coûts carbone » des produits bois y sont largement sous-estimés. En particulier, la valorisation énergétique des connexes de scierie et autres déchets de fabrication est non seulement supposée ne pas entraîner d'émission de CO_2 mais encore est souvent enregistrée avec un coefficient de substitution avantageux au titre d'économie de combustibles fossiles. Ainsi est-il permis de douter que, dans le cadre des scénarios précédents, on puisse trouver des substitutions de produits suffisamment nombreuses et favorables pour un volume de récolte de bois d'œuvre et d'industrie qui serait de 537x10^6 m^3 dans la première hypothèse (augmentation de 50 %) 860 x10^6 m^3 dans la seconde (augmentation de 80 %), les volumes de produits correspondants étant 252 x10^6 m^3 (première hypothèse) et 404 x10^6 m^3 (deuxième hypothèse).

Il est possible, à titre indicatif, d'évaluer globalement le coût carbone « moyen » des produits bois finis réalisés à partir de l'augmentation de récolte de bois d'œuvre et d'industrie dans le cadre des scénarios précédents. Ce coût, évalué entre 1,46 tC/tC et 1,9 tC/tC au niveau de la récolte selon l'importance des perturbations apportées par le prélèvement à la production biologique, est porté, avec une proportion $\gamma = 0{,}53$ de déchets, à 3,1tC/tC et 4,2 tC/tC au niveau des produits finis. En termes de volumes et d'émission de dioxyde de carbone, ces chiffres correspondent à une fourchette de ≈ 2,9 à ≈ 3,9 tonnes de CO_2 par mètre-cube de produits bois.

IV-5 Conclusion : Un scénario de décroissance des prélèvements pour l'énergie sur la période 2015-2050

L'analyse précédente (section IV-4) permet de conclure qu'une augmentation du volume de récolte de bois par rapport au niveau actuel, qu'elle soit destinée à la fourniture d'énergie ou à la fabrication de produits plus ou moins durables ne peut être justifiée au nom de la lutte contre le changement climatique. Ceci ne veut pas dire que l'exploitation du bois produit par les forêts n'est pas légitime mais simplement qu'elle doit répondre à d'autres impératifs, de nécessité (absence d'alternative), d'utilité (qualités du matériau bois) ou même d'agrément (flambées festives) sans oublier, bien sûr, les contraintes techniques, économiques et sociales. Mais, comme pour toute autre activité humaine, cette exploitation doit être soumise à une comptabilité carbone précise permettant de juger, cas par cas, de son bien-fondé vis-à-vis de l'objectif incontournable de réduction des émissions de gaz à effet de serre. Dans cette optique, l'utilisation de bois pour l'énergie, fortement

émissive, est néfaste du point de vue climatique, et inutile car il existe, en abondance, de nombreuses sources d'énergie moins carbonées (charbon, pétrole, gaz naturel...) ou, mieux, non carbonées (solaire thermique passif, solaire thermodynamique, solaire photovoltaïque, hydraulique, éolien, géothermie, nucléaire...). Aussi n'est-il pas aberrant d'envisager une décroissance de la part de récolte destinée à des usages combustibles directs, en maintenant égale celle qui répond à des nécessités en matière de bois d'œuvre et d'industrie.

Le scénario déroulé ci-après prévoit une réduction progressive de la récolte de bois pour l'énergie, à partir de son niveau de 2015 soit 31,1x10^6 m^3/an pour parvenir à un remplacement total par des sources non carbonées en 2050. Cet objectif revient à fixer à 0,89x10^6 m^3/an le rythme annuel de cette réduction. Ce chiffre correspond à 1,27 x10^6 m^3/an^2 en termes de prélèvement, compte tenu des pertes d'exploitation (≈30 %) soit encore à 0,34MtC/an^2 en contenu carbone. La récolte de bois d'œuvre et de bois d'industrie n'est pas modifiée.

La figure IV-9 représente l'évolution des stocks dans l'hypothèse d'une production biologique brute inchangée par rapport au scénario de référence. Dans la biomasse ligneuse, ainsi que dans la litière et le sol, ces stocks de carbone augmentent au fil des ans de manière nettement plus importante que dans le scénario au fil de l'eau. Il en résulte que le puits de carbone (figure IV-10 a), par sa composante forestière essentiellement, est en rapide croissance jusqu'à 39 ou 34,2 MtC/an en 2050 selon que la production G est, ou non, affectée par l'exploitation. Corrélativement, l'empreinte carbone (figure IV-10 b) qui intègre la balance carbone-émission de l'ensemble du système forêt-bois sur la période concernée, s'élève à 1054 ou 990 MtC en augmentation de 303 ou 239 MtC respectivement par rapport au scénario « au fil de l'eau. Le contenu carbone des récoltes ayant diminué de 146 MtC, le « gain » carbone est de 2,1 ou 1,64 tC/tC selon que l'exploitation affecte ou non la production biologique G ce qui correspond à une émission évitée de 1,97 ou 1,54 tonnes de CO2 par mètre-cube de bois non récolté. Les gains d'émission par réduction de récolte sont, en valeur absolue, sensiblement égaux aux coûts carbone qu'on a obtenus dans les scénarios d'augmentation. L'égalité aurait été stricte si la répartition β de la récolte entre bois énergie et bois d'œuvre ou d'industrie avait été la même dans le scénario de référence et le scénario actuel (β est constant dans le premier scénario, décroissant dans le second).

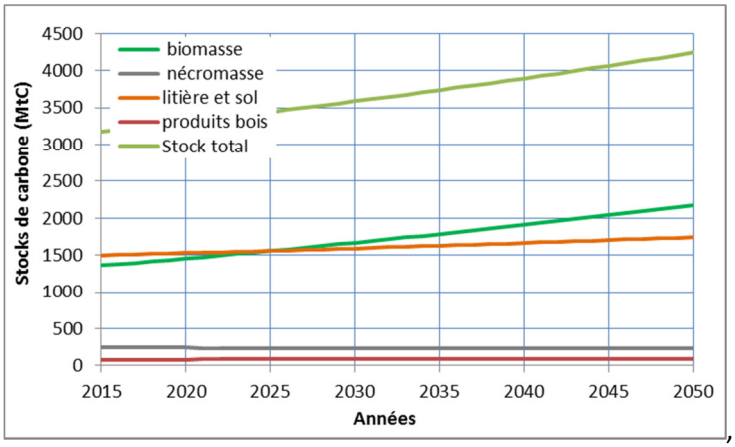


Figure IV-9 – Évolutions des stocks de carbone
(scénario de réduction totale de la récolte de bois énergie sur la période 2015-2050)

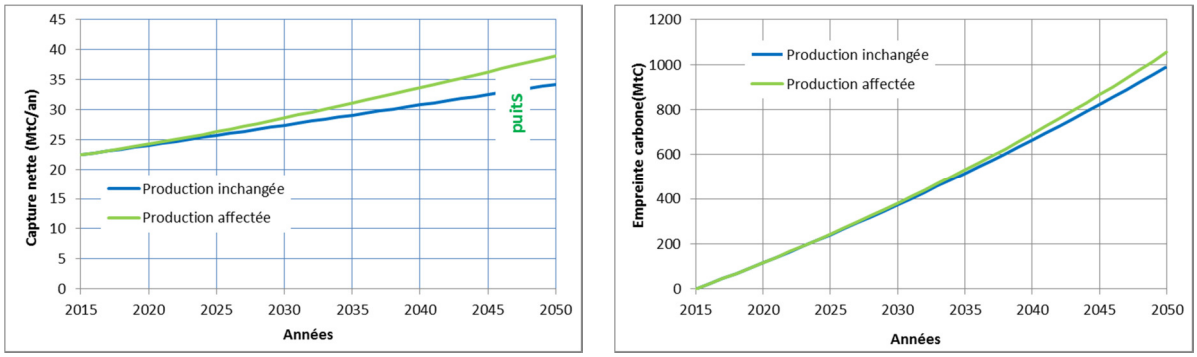


Figure IV-10 – Évolutions du puits de carbone (a) et de l'empreinte carbone (b)
(scénario de réduction totale de la récolte de bois énergie sur la période 2015-2050)

Si, pour répondre aux besoins de chaleur, on doit substituer d'autres combustibles au bois non récolté, il convient de retrancher des gains précédemment calculés le coût carbone de l'utilisation du combustible de remplacement. Le gain net s'obtient alors à partir du gain brut en multipliant par le facteur $(1 - F_f/F_b)$ où F_b et F_f sont les facteurs d'émission effectifs du bois et du combustible alternatif. En se reportant aux valeurs de facteurs d'émission indiquées dans le tableau III-2, on voit que le gain net est significativement réduit lorsqu'on a recours à des combustibles fossiles (de 52 à 66 % par substitution au charbon, de 38 à 49% dans le cas du pétrole, de 33 à 42 % dans celui du gaz naturel) mais ne l'est que de seulement 10 à 12 % par substitution de la chaleur électrique avec le « mix » français.

Si l'on fait donc appel à des énergies non carbonées pour remplacer le bois, seuls restant utilisés pour l'énergie les déchets d'industrie et les produits bois en fin de vie, le scénario de diminution progressive de la récolte utilisée directement comme combustible conduit à un puits de carbone de 34 à 39 MtC/an en 2050, soit environ 135 $MtCO_2$/an, suffisant à lui seul pour assurer la neutralité de la France en CO_2 sous réserve d'une réduction de l'ordre d'un facteur 3 des émissions annuelles de carbone fossile (345 $MtC0_2$ en 2017 d'après les données du CITEPA 2019).

***

CONCLUSION GÉNÉRALE

Pour ce qui est de la dynamique du carbone et de ses échanges avec l'atmosphère, la forêt est un système relativement simple, que l'on peut concevoir comme constitué par un assemblage aussi détaillé qu'on le souhaite de compartiments dans lesquels s'applique la loi de conservation, à savoir que la variation du stock résulte de la différence entre flux entrants et sortants. De la même manière, la dynamique du carbone ligneux au travers des utilisations des bois récoltés peut être décrite en termes de compartiments, de stocks et de flux. Pour évidente qu'elle soit, cette conception est encore souvent occultée par l'assertion abusive de « neutralité carbone » des usages des bois qui, malheureusement, inspire la plupart des décisions politiques actuelles en matière forestière ou énergétique. C'est par un retour aux fondamentaux que l'on peut mette en lumière les véritables moyens d'action permettant à la forêt de jouer pleinement son rôle dans l'atténuation du changement climatique.

La neutralité carbone : un cas particulier

Si l'on se reporte à la figure C-1 qui illustre sommairement les échanges de carbone entre, d'une part, la forêt et l'utilisation de son bois, d'autre part, l'atmosphère, l'assertion de neutralité carbone revient à présupposer que la capture nette de carbone par la forêt (flux annuel Φ_C) compense exactement l'émission par combustion ou décomposition du bois récolté (flux $\Phi_É$). Une telle situation, dans laquelle il n'y a pas de variation du stock de carbone dans le système forêt-bois, et donc aucun échange direct net avec l'atmosphère, ne peut s'envisager, sur quelque durée, que dans des conditions de régime permanent statique.

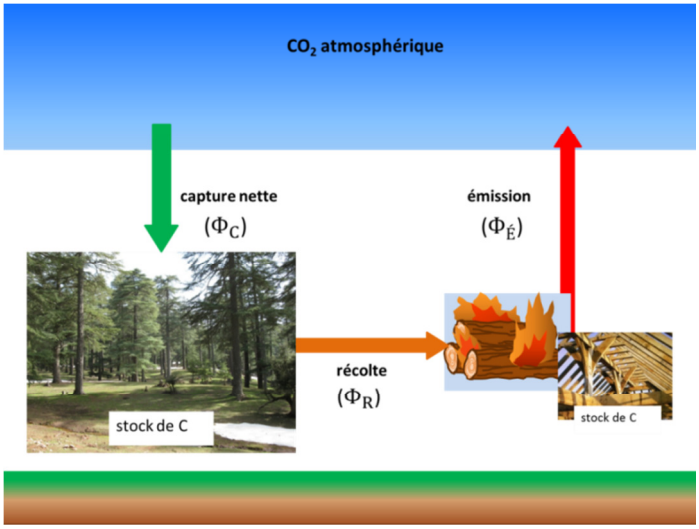


Figure C-1 – Flux de carbone échangés entre l'atmosphère, d'une part, la forêt et l'utilisation de son bois, d'autre part.

La comptabilité carbone, dans ces conditions, est simple : on pose « zéro » en ce qui concerne la biomasse ligneuse, et il ne reste qu'à faire la différence entre, d'une part, les émissions qui sont « évitées » lorsque du bois est substitué à d'autres combustibles et matériaux et, d'autre part, les

émissions annexes (« amont » relatives à toutes les opérations qui vont de l'exploitation forestière à la mise à disposition du bois récolté et « grises » intervenant dans la fabrication des produits).

La qualification de « neutralité carbone » ne peut donc s'appliquer qu'à des ensembles forestiers gérés à stock ligneux constant et n'a donc pas de généralité. L'émission de dioxyde de carbone par le bois qui brûle ou se décompose n'est pas niée : elle n'a pas besoin d'être précisée puisqu'on la suppose exactement compensée par la capture de CO_2 dans l'atmosphère. La « neutralité » est malheureusement invoquée, au prétexte de lutte contre le changement climatique, pour justifier l'augmentation des récoltes, en contrevenant à la nécessaire condition de stock constant : la substitution du bois à d'autres combustibles ou d'autres matériaux « éviterait » les émissions qui sont liées à leur usage. Des interprétations dégradées telles que « le bois, en brûlant, ne fait que rendre à l'atmosphère le carbone qui lui a été emprunté » ou, pire, « le facteur d'émission du bois est nul » sont alors mises en avant, ouvrant la porte à des excès dommageables aux écosystèmes forestiers et à l'évolution du climat.

La réalité des échanges avec l'atmosphère

Les flux Φ_C et $\Phi_É$ ne sont généralement pas égaux comme le présume l'assertion de « neutralité carbone ». Si $\Phi_C > \Phi_É$, la capture l'emporte sur l'émission : l'ensemble constitué par la forêt et les usages du bois accumule du carbone et joue le rôle de « puits » vis-à-vis de l'atmosphère, ce qui est évidemment favorable à l'atténuation du changement climatique. Le rôle est celui de source dans le cas contraire ($\Phi_C < \Phi_É$), avec déstockage de carbone, situation qu'il convient d'éviter.

La comptabilité carbone est alors plus compliquée que ne le laisse supposer l'assertion de neutralité. La variable temps intervient. L'empreinte carbone, définie comme l'intégrale de la balance capture-émission sur une période de temps donnée, est fonction de l'horizon de temps que l'on se fixe, et son évaluation requiert les outils mathématiques de l'analyse.

Pour chacun des compartiments de stockage (les principaux étant la biomasse ligneuse, la nécromasse, la litière et le sol, les produits bois durables) comme pour le système vu dans son ensemble, le principe de conservation se traduit par une équation différentielle du premier ordre entre stock et flux de carbone, dont la solution est immédiate si on peut admettre la proportionnalité du flux sortant au stock ou, ce qui revient au même, si le temps de résidence du carbone dans le compartiment ou le système est une constante. Cette approximation de linéarité et d'invariance, qu'on prend soin de valider dans la première partie du document, conduit à des modèles simples pour l'étude de la dynamique du carbone dans la forêt et les filières d'utilisation de son bois (deuxième partie). Elle permet de conférer au système forêt-bois, en première analyse, l'ensemble des propriétés des systèmes linéaires invariants et de raisonner par analogie comme si le carbone était un fluide circulant de réservoir en réservoir entre son captage et son retour à l'atmosphère (problèmes de « baignoires et robinets » !). On est alors amené, sans grand effort mathématique, à des conclusions radicalement différentes de celles qui découlent de l'assertion de « neutralité carbone » :

- L'empreinte carbone *intrinsèque* du système forêt-bois est définie comme la mesure, sur une période de temps donnée, de l'échange net de carbone avec l'atmosphère, abstraction faite des émissions « amont » et « grises ». Cette empreinte correspond, selon le principe de conservation, à la variation, sur cette période, du stock total de carbone dans le système. Les constantes de

temps mises en jeu dans cette variation sont diverses ; la plus importante est le temps τ de renouvellement de la biomasse ligneuse, qui se compte en dizaines d'années ou en siècles. Il en résulte que toute action sur la forêt, récolte notamment, peut se répercuter bien au-delà des horizons de temps que fixent les échéances climatiques et que la comptabilité carbone forestière ne peut se faire sur une base purement arithmétique.

- Le système forêt-bois réunissant deux sous-systèmes couplés par la récolte, on peut considérer l'empreinte carbone globale comme la somme d'une empreinte proprement forestière et de l'empreinte de l'utilisation des bois récoltés. La récolte soustrait une masse de carbone au stock forestier et a donc un impact immédiat (négatif) sur l'empreinte carbone forestière. Mais elle a aussi des effets différés (eux-mêmes négatifs) pour différentes raisons dont les principales sont les suivantes :

  - Le prélèvement s'accompagne de pertes d'exploitation (branchages laissés sur place, racines mortes ou mourantes, biomasse non ligneuse, végétation arbustive ou herbacée détruite collatéralement) qui rejoignent le compartiment de nécromasse. Le contenu carbone de ces pertes représente une part importante de celui du prélèvement (jusqu'au tiers) et donc de celui de la récolte (jusqu'à la moitié). La décomposition de ces pertes renvoie leur contenu carbone dans l'atmosphère à relativement court terme (ordre de grandeur de la décennie).
  - Selon les conditions d'exploitation, entre le prélèvement diffus et la coupe rase, la suppression d'arbres capteurs fait que la production biologique nette (flux Φ_C) se trouve plus ou moins réduite tant que le couvert forestier n'est pas rétabli. Le déficit de capture doit être porté au débit dans le bilan carbone.
  - Selon les conditions d'exploitation encore, l'évasion de carbone du sol consécutive à la perturbation de la litière et des horizons superficiels s'ajoute, pour une part encore mal définie, aux effets précédents.

  En conséquence, la récolte de bois s'accompagne, sur un laps de temps généralement court devant la constante de temps τ, de l'émission dans l'atmosphère d'une masse de carbone pouvant représenter plus de la moitié du contenu carbone de cette récolte. Encore faut-il ajouter, pour être complet, les émissions qui sont liées à toutes les opérations d'exploitation, abattage, débardage, transport... qui se succèdent jusqu'à la mise à disposition des bois récoltés (émissions « amont »).

- Certes, après récolte, la régénération naturelle ou artificielle des arbres exploités et la poursuite de la croissance des autres arbres tendent, toutes choses égales par ailleurs, à effacer les conséquences de la récolte sur l'évolution du stock de carbone forestier et donc sur celle de l'empreinte carbone. La figure C-2, qui reproduit la figure II-14, illustre ainsi l'effet d'une récolte ponctuelle sur l'empreinte carbone d'un peuplement en croissance : le « saut » a pour amplitude le contenu carbone de la récolte et l'écart d'ordonnées entre les courbes des deux empreintes, sans et avec récolte, représente, en fonction du temps écoulé, la réduction du stock de carbone forestier imputable au prélèvement. Toutes choses restant égales, cette réduction est progressivement compensée par la capture de carbone dans l'atmosphère accompagnant la reconstitution du peuplement, et, pour les temps « longs » ($t \to \infty$), finit par s'annuler. L'évolution de la forêt conduit en effet, dans les deux cas (récolte et non-récolte), au même état d'équilibre statique (stock constant) s'il n'y a pas de changement dans les pratiques sylvicoles. Il n'en reste pas moins qu'en raison de la valeur habituellement élevée de la constante de temps τ

(trois cents ans, en moyenne, pour les peuplements feuillus et résineux des forêts françaises, d'après les données d'inventaire de l'IGN), le « coût carbone » du prélèvement peut rester longtemps supérieur au contenu carbone de la récolte. Si donc les horizons de temps que l'on se fixe pour atténuer le changement climatique sont d'ordre de grandeur comparable ou inférieur à celui de τ, l'action de récolte est, en elle-même, contreproductive.

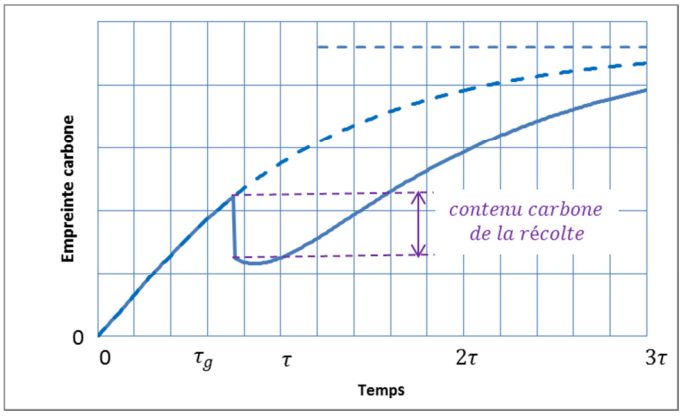


Figure C-2 – Evolution de l'empreinte carbone forestière (courbe en trait plein)
pour un scénario de prélèvement ponctuel surimposé à un prélèvement continu constant
dans un peuplement en croissance (cf. II-14)
(Les émissions annexes sont ici ignorées)

- Le carbone du bois récolté est destiné inévitablement à un retour à l'atmosphère. C'est le cas, à très court terme, si le bois sert de combustible. Si le bois est utilisé pour la fabrication de produits durables, il faut compter avec une certaine proportion de déchets ligneux non recyclés ou non recyclables ; ces déchets renvoient leur contenu carbone à l'atmosphère par combustion ou décomposition, à relativement court terme également. Les produits bois conservent leur contenu carbone, mais seulement pendant leur temps de vie et rejoignent les déchets lorsqu'ils sont hors d'usage. L'empreinte des utilisations du bois, émissions annexes comptées à part, correspond à la variation du stock de carbone issu de la récolte sur l'intervalle de temps pour lequel on détermine cette empreinte, soit, en pratique, au stockage dans les seuls produits ligneux durablement conservés. Dans le cas d'une récolte ponctuelle, le stock de carbone représenté par ces produits est inférieur, dès l'origine, au contenu carbone de la récolte et décroît en fonction du temps suivant une loi de forme exponentielle dont la constante de temps τ_{vie} est la moyenne pondérée des durées de vie des produits. Il en est de même pour l'empreinte carbone correspondante. Cette empreinte s'ajoute à l'empreinte forestière pour former l'empreinte totale du système forêt-bois. À titre d'exemple, la figure C-3 complète la figure C-2 pour quelques cas d'école. Si la totalité de la récolte de bois sert de combustible, l'empreinte totale ne diffère pas de l'empreinte proprement forestière (courbe pleine bleue) ; si la totalité de la récolte était conservée indéfiniment, l'empreinte totale se déduirait de l'empreinte forestière par une translation verticale dont l'amplitude est celle du contenu carbone de la récolte (courbe pointillée rouge). Ces deux tracés bornent l'intervalle dans lequel s'inscrit l'empreinte intrinsèque selon les proportions de bois utilisée pour l'énergie, vouée à décomposition ou réservée à des usages durables (émissions annexes mises à part). La courbe verte donne un exemple d'empreinte pour un stock initial dans les produits bois égal à la moitié du contenu carbone de la récolte et une durée de vie

moyenne τ_{vie} moitié également de la constante de temps principale τ. La prise en compte des émissions annexes (« amont » et « grises ») se traduirait par des translations de ces courbes dans le sens négatif des ordonnées.

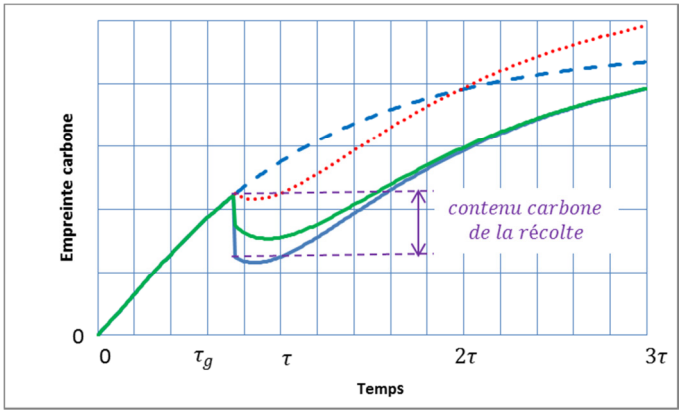


Figure C-3 – Evolution de l'empreinte carbone du système forêt-bois pour un scénario de prélèvement ponctuel surimposé à un prélèvement continu constant (cf. figure C-2)

courbe interrompue bleue : empreinte de référence (sans prélèvement ponctuel)

courbe continue bleue : récolte immédiatement consumée

courbe pointillée rouge : récolte indéfiniment conservée

courbe continue verte : récolte pour moitié conservée dans des produits bois de durée de vie moyenne $\tau/2$

(Les émissions annexes sont ici ignorées)

L'empreinte du système forêt-bois reste donc longtemps après récolte, sinon toujours, inférieure à l'empreinte qu'on observerait en l'absence de récolte, toutes choses égales par ailleurs. Réduire cet impact négatif est possible en diminuant la part de récolte destinée à l'énergie, en privilégiant les applications de bois massif pour réduire la proportion de déchets ligneux, en augmentant la durée de vie des produits... mais, comme cela est analysé dans la troisième partie, la régénération de la forêt après récolte et le stockage de carbone hors forêt dans les produits bois issus de la récolte ne peuvent, en général, compenser les pertes de carbone (pertes d'exploitation, pertes de matière, réduction transitoire de production biologique... sans oublier les émissions annexes), sauf exception (conservation de la quasi-totalité du bois récolté pendant des durées grandes devant la constante de temps τ, itinéraire sylvicole amélioré après récolte..). Il tombe d'ailleurs sous le sens que les produits bois issus de la récolte ne peuvent assurer une fonction de séquestration du carbone notable si leur durée de vie, éventuellement prolongée du temps de dégradation en décharge, ne va pas au-delà des horizons de temps imposés par les échéances climatiques (horizons de trente ans, par exemple, pour l'objectif national de « neutralité carbone » à l'horizon 2050, de quatre-vingts ans pour l'objectif de limitation à 2°C de l'augmentation de température globale à l'horizon 2100). Pour fixer les idées, dans l'utilisation qui est faite actuellement des bois en France, seulement 20 à 25 % de la masse ligneuse récoltée se retrouve dans des produits finis, du papier aux charpentes, avec une durée de vie qui, en moyenne pondérée, est de l'ordre de trente ans.

Une contribution directe des produits bois à l'atténuation du changement climatique paraît donc illusoire, dans les conditions actuelles. En France, par exemple, l'accroissement du stock de carbone dans ces produits est très probablement inférieur à un million de tonnes par an, à comparer aux quelque quinze millions de tonnes de la récolte annuelle et aux vingt-deux millions

de tonnes annuellement prélevées. Cet accroissement a donc pour prix un affaiblissement bien plus considérable du puits de carbone forestier. Ce constat apporte quelque justification à la recommandation « par défaut » des « IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories » de considérer que tout le carbone de la biomasse ligneuse prélevée est oxydé l'année même de la récolte, en tant que première mais assez bonne approximation des effets de la récolte sur l'empreinte carbone de la forêt et de l'utilisation de son bois (cf. figure C-3, courbe verte).

Les effets de substitution

En remplaçant par du bois d'autres combustibles ou d'autres matériaux, on provoque une augmentation ou une réduction des émissions de gaz à effet de serre dont on doit tenir compte, avec le bon signe, dans l'empreinte carbone de l'utilisation du bois. L'évaluation de telles substitutions devrait se faire au cas par cas, sur la base d'analyses comparées du cycle de vie des produits substituant et substitué, et n'être enregistrée que si la substitution est effective. Or, ces analyses sont généralement conduites sous l'hypothèse contestée de « neutralité carbone » de la matière ligneuse et la plupart des auteurs considèrent que les produits bois substituables remplacent effectivement des produits homologues. Il en résulte que les effets attendus de ces substitutions ne correspondent pas à la réalité ou sont largement surestimés.

- En ce qui concerne **la substitution énergétique**, l'argument actuel est qu'en raison de la « **neutralité carbone »** de l'utilisation du bois, la substitution de bois à des combustibles fossiles évite les émissions de combustion de ces derniers. Il y a dans cet énoncé deux entorses à la rigueur. La première est que « neutralité » veut dire « égalité capture-émission », et absolument pas « absence d'émission lorsqu'on brûle du bois ». La seconde est que la « neutralité » est un cas particulier qu'il est abusif d'ériger en cas général. Or, le facteur d'émission du bois est plus élevé que celui de tout autre combustible et quand on tient compte des pertes d'exploitation et de toutes les émissions « amont » qui sont liées à l'extraction, au transport, au raffinage, au conditionnement des divers combustibles, on arrive à la conclusion que, pour une même énergie rendue, le total des émission du bois à l'usage est presque le triple de celui du gaz naturel, le double de celui du pétrole et encore une fois et demie celui du charbon (Figure C-4). En remplaçant les combustibles fossiles par du bois, on augmente les émissions au lieu de les réduire.

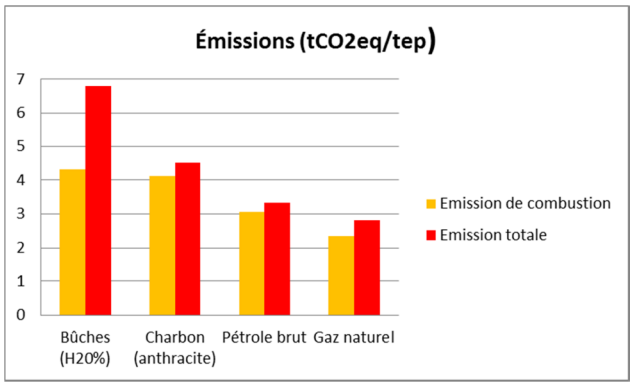


Figure C-4 – Émissions de combustion (émissions intrinsèques) et émissions totales compte tenu des émissions « amont » et des pertes d'exploitation

tCO2eq/tep : tonnes de dioxyde de carbone (ou équivalent) émises par tonne-équivalent-pétrole d'énergie rendue

La substitution énergétique est donc contreproductive et il serait opportun, en conséquence, de diminuer la consommation de bois énergie par substitution de combustibles moins carbonés ou, mieux, non carbonés. À cette proposition, on oppose souvent que « le bois pourrit inutilement si on ne le brûle pas ». Cet argument est fragile et peut être retourné : le bois des arbres vifs ne pourrit pas, celui des arbres exploités ne pourrit que si on le veut bien, le bois mort en forêt participe à la fertilité des stations et au maintien de la biodiversité.

- En ce qui concerne la **substitution matériau**, il convient d'être plus nuancé. Il est sans doute possible de trouver des substitutions favorables vis-à-vis de matériaux énergivores et donc fortement émissifs comme l'acier, l'aluminium, ou le béton. Cependant, comme indiqué plus haut, les analyses de cycle de vie qui permettent l'évaluation des émissions évitées présupposent, le plus souvent, la neutralité carbone du bois ; notamment, les émissions dues à la combustion ou la décomposition des déchets de fabrication ne sont généralement pas ou mal prises en compte. Il en résulte que les effets espérés de substitutions sont, dans la plupart des cas, largement surestimés.

  Par ailleurs, les réductions d'émission qu'entraînent des substitutions choisies ne peuvent être que marginales. En effet, la plus grande part des produits bois nouvellement fabriqués ne sert qu'à remplacer les produits parvenant au terme de leur usage : remplacer du papier par du papier, une charpente par une charpente n'évite pas des émissions. Il n'y a substitution effective que s'il y a remplacement concret et mesurable de la consommation (ou de la production) d'un certain type de produit par un produit bois ayant même fonction et même durée d'usage. L'augmentation de la consommation d'un produit bois qui ne fait pas diminuer dans la même proportion c de produits concurrents ne constitue pas une substitution effective mais une addition à la consommation**.**

  Dans ces conditions, il est abusif de prôner, comme c'est le cas actuellement, des augmentations massives de récoltes sans avoir préalablement identifié les substitutions possibles et quantifié convenablement les réductions d'émission (ou augmentations) qu'elles impliquent.

- Mais encore**,** les partisans de l'augmentation des prélèvements en vue de substitutions favorables ne tiennent pas assez compte de l'impact négatif de cette augmentation sur le puits de carbone forestier.

À titre d'exemple, les graphiques de la figure C-5 montrent l'évolution prévisible du puits de carbone représenté par la forêt française et l'utilisation de son bois sur la période 2015-2050 suivant trois scénarios, abstraction faite des effets de substitution. Le scénario « au fil de l'eau », dans lequel on ne change rien aux pratiques actuelles, garantit le maintien jusqu'en 2050 d'un puits de carbone de l'ordre de 20 millions de tonnes par an (70 millions de tonnes de CO_2) alors que les scénarios d'augmentation progressive des prélèvements jusqu'à 50 ou 80 % en 2050 par rapport à leur niveau de 2015, conduisent à la quasi annulation de ce puits ou, pire, à sa conversion en source. Il est douteux que les affaiblissements du puits de carbone représentés sur la figure C-5, puissent être contrebalancés par des effets de substitution.

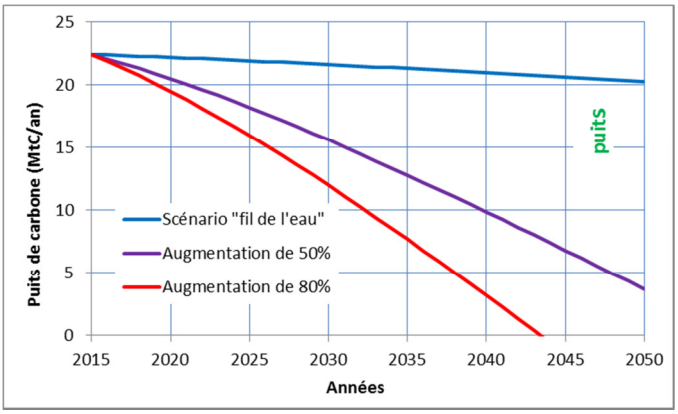


Figure C-5 – Évolutions du puits de carbone (forêt + produits bois) dans un scénario « au fil de l'eau » et pour des augmentations linéairement progressives des prélèvements de 50 % et 80 % sur la période 2015-2050
(forêt française, surface de production constante, climat constant, effets de substitution ignorés)

Forêt et atténuation du changement climatique

L'option actuelle d'augmenter les prélèvements en forêt pour faire jouer des effets de substitution est, par conséquent, une lourde erreur. Ceci ne veut pas dire que l'exploitation du bois produit par les forêts n'est pas légitime, mais seulement que cette exploitation ne peut être justifiée par des raisons d'atténuation du changement climatique. L'exploitation ne devrait répondre, simplement, qu'à des nécessités techniques, économiques, sociales ou sociétales, tout en étant soumise, comme la plupart des activités humaines, à une comptabilité carbone précise permettant de juger, cas par cas, de son bien-fondé (« zéro » pour facteur d'émission de la biomasse n'est pas une comptabilité). Cette comptabilité permettrait la mise en lumière, sans ambiguïté, des bons choix.

Par contre, pour faire jouer à la forêt un rôle important et peut-être décisif d'atténuation du changement climatique, le moyen direct est d'augmenter les surfaces boisées et les volumes sur pied, donc de stocker du carbone dans les arbres vifs et, secondairement et sous condition, dans des produits bois. Pour être efficace, cette stratégie doit s'appuyer davantage sur la reforestation et la restauration de forêts naturelles que sur le développement de forêts de plantation à destination productive. Les forêts françaises, en ce qui les concerne, sont actuellement en croissance, croissance qui pourrait être favorisée en diminuant les prélèvements inutiles (notamment ceux de bois énergie). La figure C-5 montre que le scénario simple « au fil de l'eau » offre la perspective d'un puits de carbone de 20 millions de tonnes en 2050 (plus de 70 $MtCO_2$), puits qui pourrait être porté à environ 35 MtC/an (130 $MtCO_2$/an) si on diminuait, d'ici là, le prélèvement de 50%, ce qui permettrait de rendre la France « neutre en CO_2 » dès cette date, grâce à la forêt, sous réserve d'une réduction de l'ordre d'un facteur 3 des émissions annuelles de carbone fossile (≈ 345 $MtC0_2$ en 2017 d'après les données du CITEPA 2019). Cette diminution de prélèvement est concevable en la faisant porter principalement sur le bois énergie, remplaçable par des sources moins carbonées ou, mieux, non carbonées.

Encore éloignées de leur état d'équilibre avec un volume moyen d'arbres sur pied de seulement 170 mètres-cubes par hectare (bois fort tige), les forêts françaises ont, sur leur emprise actuelle (environ 16 millions d'hectares), une capacité de stockage de carbone de deux à trois fois supérieure au stock présent. On peut ainsi envisager, à surface constante, de retirer de l'atmosphère de 1,25 à 2,5

gigatonnes de carbone, non compris le stockage dans le sol. Avec des constantes de temps de la dynamique forestière qui sont de l'ordre de la centaine d'années, un stockage progressif peut se poursuivre bien au-delà des échéances climatiques de la fin de ce siècle en maintenant un puits de carbone important.

Certes, l'efficacité du puits de carbone ne peut que s'amoindrir au fil du temps, à l'approche de l'état d'équilibre de la forêt défini par l'égalité entre la productivité biologique nette (mortalité déduite) et le prélèvement. La stratégie de stockage en forêt n'est donc pas une solution du problème climatique mais un moyen de retarder les échéances. Cependant, il sera toujours envisageable, plutôt que de voir s'annuler le puits de carbone forestier, de récolter les bois impropres à un usage durable et de les stocker dans des conditions permettant d'assurer leur conservation. Dans un avenir pas trop lointain, des techniques de CCS (Carbon dioxide Capture and Storage), consistant à séparer le CO_2 des autres gaz de combustion, à la source, et à l'injecter dans des formations géologiques telles que gisements épuisés de gaz ou de pétrole ou aquifères salins profonds, pourraient permettre d'utiliser comme combustible la matière ligneuse stockée et de reprendre une exploitation soutenue avec, cette fois, moindre impact sur le climat. Les principales objections à une stratégie de stockage direct de carbone sont de nature économique ; elles tomberont d'elles-mêmes dans l'urgence climatique. Sans attendre, pour précipiter l'action, une suggestion est d'étendre le champ d'application de la taxe carbone aux émissions du secteur forêt-bois, ce qui est logique puisque le bois est un combustible carboné, et de subventionner le stockage forestier de carbone grâce au produit de cette taxe.

***

Références bibliographiques

ADEME (2015) Forêt et atténuation du changement climatique. Les avis de l'ADEME. Juin 2015

ADEME (2016) Base carbone, version du 27 avril 2016, consultée sur la « Plateforme ouverte des données publiques françaises », *https://www.data.gouv.fr/fr/datasets/base-carbone/*

ADEME & MEEDM Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie & Ministère de l'écologie, de l'énergie, du développement durable et de la mer (2009) Le Bois énergie et la qualité de l'air, note de synthèse, 17 juillet 2009

AF&PA American Forest & Paper Association (2015) Carbon Neutrality of Biomass, January 2015

AGRESTE (2014) Récolte de bois et production de sciages en 2013. Agreste Primeur, numéro 328, décembre 2014

AGRESTE (2015) Récolte de bois et production de sciages en 2014. Agreste Primeur, numéro 333, décembre 2015

AGRESTE (2016) Récolte de bois et production de sciages en 2015. Agreste Primeur, numéro 341, décembre 2016

AGRESTE (2017) Récolte de bois et production de sciages en 2016. Agreste Primeur, numéro 349, décembre 2017

AGRESTE (2018) Récolte de bois et production de sciages en 2017. Agreste Primeur, numéro 355, décembre 2018

Agostini A, Giuntoli J, Boulamanti A (2014) Carbon accounting of forest bioenergy, conclusions and recommendations from a critical literature review. JRC scientific and policy report EUR 25354 EN edited by : Luisa Marelli

Arzelier D (2010) Représentation et analyse des systèmes linéaires, version 6. http://www.laas;fr/~arzelier

Bossy E (2014) Systèmes linéaires et signaux. ESPCI Paris

Brunner I, Bakker M R, Björk R G, Hirano Y, Lukac M, Aranda X, Børja I, Eldhuset T D, Helmisaari H S, Jourdan C, Konôpka B, López B C, Miguel Pérez C, Persson H, Ostonen I (2013) Fine-root turnover rates of European forests revisited : an analysis of data from sequential coring and ingrowth cores. Plant Soil (2013) 362:357–372

Carbofor (2004) Séquestration de Carbone dans les grands écosystèmes forestiers en France, Coordination D. Loustau, Unité EPHYSE, INRA Bordeaux, Juin 2004

CCNUCC (1998) Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change, United Nations, 1998

Ciais P, Schelhaas M J, Zaehle S, Piao S L, Cescatti A, Liskis J, Luyssaert S, Le-Maire G, Schulze E-D, Bouriaud O, Freibauer A, Valentini R, Nabuurs G J (2008) Carbon accumulation in European forests. Nature Geoscience, Vol 1, July 2008

CITEPA (2019) Inventaire des émissions de gaz à effet de serre en France de 1990 à 2017. 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 – Mars 2019

COPACEL (2018) Rapport statistique 2017 de l'industrie papetière française. Union française des industries des cartons, papiers et celluloses, version juin 2018

Décourt N (1964) Les tables de production, leurs limites et leur utilité. Revue Forestière Française, août-septembre 1964, pp.640-657

Décourt N (1972) Tables de production provisoires pour l'épicéa commun dans le nord-est de la France. Ann. Sci. forest. 1972, 29 (1) pp. 49-65

Deheza M, N'Goran C, Bellassen V (2014) L'atténuation du changement climatique par les produits bois au sein des politiques françaises : priorité au bois énergie. Étude Climat, n°47, CDC Climat Recherche, septembre 2014

Deroubaix G (2017) Flux et stocks de carbone dans les produits bois : prise en compte dans les déclarations environnementales. JEMAB 2017 Atelier 3 : Labels et réglementation carbone

Deroubaix G, Vial E, Cornillier C (2012) Cycles de vie des produits à base de bois et séquestration du carbone, Innovations Agronomiques 18 (2012), 31-37

Déry P (2007) Substitution énergétique Mythe ou réalité ? Rapport sur l'énergétique régionale du Saguenay–Lac- St-Jean, Québec, Canada, octobre 2007

Dhôte J-F, Leban J-M, Saint-André L, Derrien D, Zhun M, Loustau D, Achat D, Roux A, Schmitt B (2016) Leviers forestiers en termes d'atténuation pour lutter contre le changement climatique. Rapport d'étude pour le Ministère de l'agriculture, de l'agroalimentaire et de la forêt (MAAF), INRA-DEPE, juin 2016

Dupouey J-L et Pignard G (2001) Quelques problèmes posés par l'évaluation des stocks et flux de carbone forestiers au niveau national. Rev For Fr LIII : 294-300

Écoiffier M (2017) Une analyse de la baisse des émissions de CO2 dues à la combustion d'énergie en France depuis 1990. Insee références, les acteurs économiques et l'environnement, édition 2017)

EEA (2011) Opinion of the EEA Scientific Committee on Greenhouse Gas Accounting in relation to bioenergy. European Environment Agency, 15 September 2011

EU (2003) 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

EU (2009) Directive 2009/28/CE du Parlement européen et du Conseil du 23 avril 2009 relative à la promotion de l'utilisation de l'énergie produite à partir de sources renouvelables et modifiant puis abrogeant les directives 2001/77/CE et 2003/30/CE, Journal officiel de l'Union européenne, 5.6.2009, Annexe V, page 140/55

EU (2018) 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

FC Forestry Commission (2015) Use Wood for Energy, updated 04/02/2015

FCBA (2012) Carbone. Carbone Forêt-Bois : Des faits et des chiffres. 2012

FCBA (2018) Memento 2018

Garrett L G, Kimberley M O, Oliver G R, Pearce S H, Beets P N (2012) Decomposition of coarse woody roots and branches in managed Pinus radiata plantations in New Zealand – A time series approach. Forest Ecology and Management 269 (2012) 116–123

Goudet M (2016) Bilan de la santé des forêts 2015. Département de la Santé des Forêts, Ministère de l'agriculture, de l'agroalimentaire et de la forêt (2016)

Gustavsson L, Börjesson P, Johansson B and Svennningson P (1995) Reducing CO2 emissions by substituting biomass for fossil fuels. Energy, 20, Issue 11, 1097–1113.

IEA Bioenergy (2005) « Answers to ten frequently asked questions about bioenergy, carbon sinks and their role in global climate change », Second edition compiled and edited by Robert Matthews and Kimberley Robertson, IEA Bioenergy Task 38, 2005.

IFN (2005) La forêt française : un puits de carbone ? Son rôle dans la limitation des changements climatiques. L'If, n°7, mars 2005

IFN (2011a) Prélèvements de bois en forêt et production biologique : des estimations directes et compatibles. L'If, n°28, 3e et 4e trimestre 2011

IFN (2011b) La forêt française : les résultats issus des campagnes d'inventaire 2006-2010, pour bien comprendre les résultats publiés. Inventaire Forestier National, 2011

IGN (2015) Les flux de bois en forêt. Institut national de l'information géographique et forestière, Service de l'inventaire forestier et environnemental. © IGN 2015

IGN (2018) Le memento, inventaire forestier édition 2018

INSEE (2017) Insee Références, édition 2017 - Fiches - Énergie et développement durable

IPCC (1996a) Revised 1996 Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories – Reference manual – Chapter 5 Land-Use Change & Forestry, page 5.17, box 5

IPCC (1996b) Revised 1996 Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories – Reference manual – Chapter 1 Energy, page 1.33, Chapter 5 Land-Use Change & Forestry, page 5.9

IPCC (2006) 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T. and Tanabe K. (eds). Published: IGES, Japan. Volume 2 : Energy, Chapter 2 : Stationary combustion - Volume 4: Agriculture Forestry and Other Land Use, Chapter 4 : Forest Land

IPCC (2014) Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel and J.C. Minx (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Johnson E (2009) Goodbye to carbon neutral: getting biomass footprints right. Environ Impact Assess Rev 29:165–168

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 (2017) 616–628

JRC (2013) Well-to-wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context. Well-to-tank Appendix 1 – Version 4.0 : Conversion factors and fuel properties. JRC Technical Reports : Report EUR 26028 EN, 2013

Krinner G, Viovy N, de Noblet-Ducoudré N, Ogée J, Polcher J, Friedlingstein P, Ciais P, Sitch S, Prentice J C (2005), A dynamic global vegetation model for studies of the coupled atmosphere-biosphere system, Global Biogeochemical Cycles, 19, GB1015

Kurz W A, Dymond C C, White T M, Stinson G, Shaw C H, Rampley G J, Smyth C, Simpson B N, Neilson E T, Trofymow J A, Metsaranta J, Apps M J (2009) CBM-CFS3 : A model of carbon-dynamics in forestry and land-use change implementing IPCC standards. Ecological Modelling 220 (2009) 480–504

Lanier L (1994) Précis de Sylviculture, 2ème édition, ENGREF, Nancy 1994

Leturcq Ph (2011) La neutralité carbone du bois énergie : Un concept trompeur. Rev For Fr (Nancy) LVIII:72

Leturcq Ph (2018) Forêt, bois, CO2 : Le bois énergie mis en question, mars 2018 [rapport, annexes et résumé mis à disposition sur *http://www.prosilva.fr* (onglet « Docs », rubrique « Brochures et articles » et sur *http://www.pijouls.com/blog/le-bois-energie-eh-oui-encore/*]

LTECV (2015) Loi n° 2015-992 du 17 août 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte JORF n°0189 du 18 août 2015, page 14263.

Luyssaert S, Ciais P, Piao S L Schulze E-D, Jung M, Zaehle S, Schelhaas M J, Reichstein M, Churkina G, Papale D, Abril G, Beer C, Grace J,Loustau D, Matteucci G, Magnani F, Nabuurs G J, Verbeek H, Sulkava M, van der Werf G R, Janssens I A, and members of the CARBOEUROPE – IP Synthesis Team (2010) The European carbon balance. Part 3: forests. Global Change Biology (2010) 16, 1429–1450

MAA (2018) Le marché du bois en France ; situation actuelle et perspectives à court terme. Ministère de l'agriculture et de l'alimentation. CEE-ONU, Commission économique pour l'Europe des Nations Unies, Comité des Forêts et de l'Industrie Forestière, 76ème session, COFFI, Vancouver, 5-9 novembre 2018, Octobre 2018

MAAF (2014) Le marché du bois en France ; situation actuelle et perspectives à court terme. Ministère de l'agriculture de l'agroalimentaire et de la forêt. Comité du bois, CEE-ONU, Commission économique pour l'Europe des Nations Unies, 72ème session. Octobre 2014

MAAF (2015) Le marché du bois en France ; situation actuelle et perspectives à court terme. Ministère de l'agriculture de l'agroalimentaire et de la forêt. CEE-ONU, Commission économique pour l'Europe des Nations Unies, Comité des Forêts et de l'Industrie Forestière, 73ème session « Silva 2015 », Octobre 2015

MAAF (2016) Le marché du bois en France ; situation actuelle et perspectives à court terme. Ministère de l'agriculture de l'agroalimentaire et de la forêt. CEE-ONU, Commission économique pour l'Europe des Nations Unies, Comité des Forêts et de l'Industrie Forestière, 74ème session, COFFI, Genève 18-20 octobre 2016, Septembre 2016

MAAF (2017) Le marché du bois en France ; situation actuelle et perspectives à court terme. Ministère de l'agriculture de l'agroalimentaire et de la forêt. CEE-ONU, Commission économique pour l'Europe des Nations Unies, Comité des Forêts et de l'Industrie Forestière, 75ème session, COFFI, Varsovie 9-13 octobre 2017, Septembre 2017

Maaf et IGN (2016) Indicateurs de gestion durable des forêts françaises métropolitaines. Ministère de l'agriculture de l'agroalimentaire et de la forêt et Institut national de l'information géographique et forestière, édition 2015

Mitchell SR, Mark EH, O'Connell KEB (2012) Carbon debt and carbon sequestration parity in forest bioenergy production. GCB Bioenergy , doi: 10.1111/j.1757-1707.2012.01173.x

Meersmans J, Martin M P, Lacarce E, De Baets S, Jolivet C, Boulonne L, Lehmann S, Philippe N, Saby A, Bispo A, Arrouays D (2012) A high resolution map of French soil organic carbon, Agron. Sustain. Dev. (2012) 32:841–851

négaWatt (2017) Association négaWatt. Scénario négaWatt 2017-2050, Dossier de synthèse.

Oliver C D, Nedal N, Lippke B, McCarter J (2014) Carbon, Fossil Fuel, and Biodiversity Mitigation with Wood and Forests. Journal of sustainable Forestry, 33(3): 248-275.

Paine C E T, Marthews T R, Vogt D R, Purves D, Rees M, Hector A and Turnbull L A (2012) How to fit nonlinear plant growth models and calculate growth rates: an update for ecologists. Methods in Ecology and Evolution 2012, 3, 245–256.

Pettersen R C (1984) The chemical composition of wood. In : Rowell, Roger M., ed. The chemistry of solid wood. Advances in chemistry series 207. Washington, DC : American Chemical Society 1984 ; Chapter 2

Pingoud K, Perälä A-L, Pussinen A (2001) Carbon dynamics in wood products. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change 6: 91–111, 2001.

Pingoud K, Perälä A-L, Soimakallio S and Pussinen A (2003) Greenhouse gas impacts of harvested wood products. Evaluation and development of methods. Espoo 2003. VTT Tiedotteita. Research Notes 2189.

Pingoud K, Pohjola J, Valsta L (2010) Assessing the integrated climatic impacts of forestry and wood products. Silva Fennica 44(1): 155–175.

PNFB (2017) Programme National de la Forêt et du bois 2016-2026. Mémoire du maître d'ouvrage en réponse à l'avis de l'autorité environnementale du 6 juillet 2016. Ministère de l'agriculture, de l'agroalimentaire et de la forêt.

Pregitzer K and Euskirchen E (2004) Carbon cycling and storage in world forests: biome patterns related to forest age. Global Change Biology (2004) 10, 2052–2077

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 dansl'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

Russell M B, Woodall C W, Fraver S, D'Amato A W, Domke G M, Skog K E (2014) Residence Times and Decay Rates of Downed Woody Debris Biomass/Carbon in Eastern US Forests, Ecosystems (2014) 17: 765–777

Saint-André L, Vallet P, Pignard G, Dupouey J-L, Colin A, Loustau D, Le Bas C, Meredieu C, Caraglio Y, Porté A, Hamza N, Cazin A, Nouvellon Y, Dhôte J-F (2010) Estimating carbon stocks in forest stands: 1. Methodological developments. *in* : Loustau D (ed.), « Forests, carbon cycle and climate change », Chapter 4 : 79-100 , Quae, Versailles, 2010

Sathre R, O'Connor J (2010) Meta-analysis of greenhouse gas displacement factors of wood product substitution. Environmental Science & Policy, Vol. 13, Issue 2, pp. 104-114, April, 2010

Searchinger TD, Hamburg SP, Melillo J, Chameides W, Havlik P, Kammen DM, Likens GE, Lubowski RN, Obersteiner M, Oppenheimer M, Robertson GP, Schlesinger WH, Tilman GD (2009) Fixing a critical climate accounting error. Science 326:527–528

Shifley S R, He H S, Lischke H, Wang W J, Jin W, Gustafson E J, Thompson J R, Thompson F R, Dijak W D, Yang J (2017) The past and future of modeling forest dynamics : from growth and yield curves to forest landscape models. Landscape Ecol (2017) 32 : 1307–1325

Skovsgaard J P, Vanclay J K (2008) Forest site productivity: a review of the evolution of dendrometric concepts for even-aged stands. Forestry : An International Journal of Forest Research, vol. 81, Issue 1, January 2008, pp. 13-31

Smyth C E, Stinson G, Neilson E, Lemprière T C, Hafer M, Rampley, Kurz W A (2014) Quantifying the biophysical climate change mitigation potential of Canada's forest sector. Biogeosciences, 11, 3515–3529, 2014

Sterman J D , Siegel L, Rooney-Varga J N (2018) Does replacing coal with wood lower CO2 emissions? Dynamic lifecycle analysis of wood bioenergy. Environ. Res. Lett. 13 (2018) 015007

Teissier du Cros E (1981) Le Hêtre. Institut National de la Recherche Agronomique, Département des recherches forestières, ISBN 2-85340-372-6

Ter-Mikaelian M T, Colombo S J, Chen J (2015a) The Burning Question: Does Forest Energy Reduce Carbon Emissions ? A Review of Common Misconceptions about Forest Carbon Accounting. Journal of Forestry, Vol. 113, Issue 1: pp. 57-68

Ter-Michaelian MT, Colombo SJ , Lovekin D, McKechnie J, Reynolds R, Titus B, Laurin E, Chapman AM, Chen J, Maclean HL (2015b) Carbon debt repayment or carbon sequestration parity? Lessons from a forest bioenergy case study in Ontario, Canada. GCB Bioenergy 7, 704–716, doi: 10.1111/gcbb.12198

Valade A, Luyssaert S, Bellassen V, Vallet P, Njakou Djomo S (2017) Bilan carbone de la ressource forestière française. Projections du puits de carbone de la filière forêt-bois française et incertitude sur ses déterminants. Rapport final. Mars 2017, Paris. ADEME/1260C0056.

WBCSD World Business Council for Sustainable Development (2015) Recommendations on Biomass Carbon Neutrality, January 2015

Wernsdörfer H, Colin A, Bontemps J-D, Chevalier H, Pignard G, Caurla S, Leban J-M, Hervé J-C, Fournier M (2012) Large-scale dynamics of a heterogeneous forest resource are driven jointly by geographically varying

growth conditions, tree species composition and stand structure. Annals of Forest Science (2012) 69 : 829–844

Zeide B (1993) Analysis of growth equations. Forest Science, Vol. 39, No 3, pp 594-616, 1993

Zhang L, Luo Y, Yu G, Zhang L (2010) Estimated carbon residence times in three forest ecosystems of eastern China: Applications of probabilistic inversion. Journal of geophysical research, vol. 115, G01010, 2010

***