FORÊT, BOIS, CO_2
Le bois énergie mis en question

Philippe Leturcq

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

Décembre 2017

Mars 2018 (révisé)

Aux supporters E.L., H.D., G.T., E.L., E.R., J.H., J.M., J-B.M., Ch. D, E.M., M.G.,...

sans lesquels l'auteur n'aurait pas eu le courage de remettre son ouvrage sur le métier

FORÊT, BOIS, CO_2
Le bois énergie mis en question

Philippe Leturcq

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

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

AVANT-PROPOS

Depuis environ un quart de siècle, les politiques énergétiques et forestières s'appuient largement sur l'assertion de « neutralité carbone » pour l'emploi du bois comme combustible, soustrayant de fait la forêt et ses produits à une comptabilité carbone généralement exigée de toute activité humaine. Ainsi le développement du « bois énergie » est-il abusivement favorisé sans qu'on en ait préalablement évalué l'impact « effet de serre » et la question d'une gestion des forêts propre à atténuer le changement climatique est-elle éludée ou biaisée.

Le document présenté, qui comprend un texte principal et quatre annexes, est une nouvelle version, approfondie et enrichie, d'un « mémoire[(1)] », diffusé en 2011, qui a fourni matière à plusieurs publications[(2)] et interventions[(3)]. L'objectif était, à l'appui des écrits de quelques autres auteurs[(4)], d'alerter l'opinion, le monde scientifique et les décideurs politiques sur le danger que font courir à la planète des décisions en matière énergétique qui reposent sur des arguments contraires à la logique. La situation a peu évolué depuis, et la « neutralité carbone », quoique contestée (y compris par le GIEC/IPCC qui, à son corps défendant, est à l'origine du concept), est toujours considérée comme allant de soi par la plupart des acteurs de terrain, notamment forestiers, et reste inscrite comme postulat dans la plupart des directives et réglementations, nationales et internationales, relatives aux bioénergies. C'est la raison pour laquelle est proposé ce « remake ».

Après avoir situé l'importance de la forêt dans le « budget carbone » de la planète, on met en question la « neutralité carbone » des usages de la biomasse ligneuse pour la production d'énergie en soulignant les fautes de raisonnement et simplifications abusives qui sont à l'origine de ce qu'il faut bien appeler une « erreur critique » (T D Searchinger et coll. 2009). Le problème de la détermination de l'empreinte carbone de la forêt et de l'utilisation de son bois est posé en termes plus rigoureux de balance capture-émission de CO_2, en tenant compte de la dynamique du carbone forestier et de la destinée des bois récoltés. Pour faciliter la compréhension par un public aussi large que possible, le texte principal ne retient que les principaux commentaires et conclusions de développements qui font l'objet d'annexes spécifiques pouvant être lues indépendamment, choix qui présente l'avantage de pouvoir satisfaire le spécialiste comme le profane mais oblige à quelques redites. Dans l'annexe A sont rappelées les propriétés du bois en tant que combustible : en particulier est souligné le fait que, de tous les combustibles, le bois a le facteur d'émission le plus élevé, lignite peut-être excepté. L'annexe B montre la vacuité de l'assertion de « neutralité carbone » et propose un cadre simple pour la comptabilité carbone des usages des bois récoltés, qui montre notamment que la substitution du bois à des combustibles fossiles (substitution énergétique) accroît les émissions de CO_2 au lieu de les réduire, contrairement à ce qui est couramment admis. L'annexe C rappelle le cheminement qui permet d'évaluer le rôle de puits de carbone des forêts ; la forêt française dans son ensemble est prise pour exemple illustratif : celle-ci capte actuellement (capture nette) près de 30 mégatonnes de carbone par an, ce qui compense environ 25% des émissions nationales de CO_2. Le développement du bois énergie compromet évidemment cette fonction de « puits » : le bois ne peut retenir le carbone emprunté par la forêt à l'atmosphère que si on ne le brûle pas, et sa substitution aux combustibles fossiles est contreproductive du fait d'un facteur d'émission plus élevé ! L'annexe D est enfin consacrée à une analyse du rôle potentiel de la forêt et de l'utilisation de son bois dans l'atténuation de l'effet de serre, appuyée sur un modèle simple de la dynamique forestière (approximation linéaire, invariance). Cette analyse révèle les conséquences à long terme, sur l'empreinte carbone, de variations dans la production ligneuse ou dans le volume des récoltes. En reprenant l'exemple de la forêt française, on montre que partant de conditions initiales correspondant à son état de l'année 2010, un scénario « au fil de l'eau », sans augmentation des récoltes, permettrait de rendre la France globalement neutre en carbone dès 2050, si les objectifs de division par 4 des émissions fossiles se réalisaient, mais qu'au contraire, les augmentations de récolte prévues dans le cadre du Plan d'action national en faveur des énergies renouvelables et, au-delà de 2020, dans celui de la Loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte, conduisent, faute d'avoir été anticipées par des accroissements proportionnés de production biologique ligneuse, à un affaiblissement considérable du puits de carbone forestier.

La conclusion principale est que, pour faire jouer à la forêt et à l'utilisation de son bois un rôle positif d'atténuation du changement climatique, il faudrait, partant de la situation présente, augmenter la production biologique par des actions de boisements, reboisements et d'amélioration générale des peuplements, restreindre les usages énergétiques du bois, privilégier les usages durables, et stocker dans des conditions propres à assurer leur conservation, les déchets ligneux, les produits bois en fin de vie et les bois impropres à toute utilisation. Toute augmentation de récolte devrait être accompagnée sinon anticipée par un accroissement de production adapté pour compenser les pertes ligneuses et non ligneuses liées à l'exploitation forestière et à l'emploi du bois récolté. Il peut être opportun, sauf nécessité, de réduire au contraire le volume de récolte pour favoriser le stockage en forêt, dans les arbres sur pied.

Quoique spécialiste, à l'origine, de modélisation et d'analyse de systèmes physiques (on en trouvera traces dans le document), l'auteur n'est pas ignorant des sujets forestiers. Il est propriétaire actif de quatre-vingts hectares de peuplements feuillus et résineux en Ariège et il compte de nombreuses années d'animation dans des organismes s'intéressant directement à la forêt (Centre régional de la propriété forestière de Midi-Pyrénées, Syndicats de propriétaires forestiers sylviculteurs, Agence régionale pour l'environnement de Midi-Pyrénées, Groupement de développement forestier de l'Ariège « Sylvestre »). C'est précisément la réunion des problématiques dans ses deux domaines d'intérêt qui l'a convaincu de l'antinomie des rôles de source d'énergie combustible et de puits de carbone qu'on demande à la forêt de jouer.

(1) Forêt, bois, CO_2 : Mise en question des politiques de développement des usages énergétiques du bois. 24 mars 2011. Mémoire téléchargeable sur le site de Pro silva france https://www.prosilva.fr/

(2) Bois-énergie : une fausse "bonne solution" pour atténuer l'effet de serre. Forêt entreprise, n°192, 46-50, 2010
La neutralité carbone du bois énergie : un concept trompeur. Revue For. Française (Nancy) LVIII : 723-734, 2011
L'énergie du bois est-elle neutre vis-à-vis de l'effet de serre ? Forêt Wallonne, n° 123 : 55-61, mars-avril 2013
Wood preservation (carbon sequestration) or wood burning (fossil-fuel substitution),which is better for mitigating climate change ? Annals of Forest Science, Volume 71, Issue 2, pp 117-124, March 2014

(3) Assemblée générale de Pro silva France, Saint-Martin d'Uriage, 11 septembre 2010. Académie d'agriculture, Paris, 11 janvier 2012. International conference «Tackling climate change: the contribution of forest scientific knowledge », Tours, 21-24 mai, 2012. Rendez-vous nivernais de la forêt et du bois « Univerbois », Magny-Cours, 28-30 septembre 2012. Forum de la qualité de l'air, Cahors, 17 octobre 2016.

(4) R. Righelato and D. V. Spracklen : « Carbon Mitigation by Biofuels or by Saving and Restoring Forests ? », Science, Vol. 317, n°5840, p. 902, 2007.
A. Rabl, A. Benoist, D. Dron, B. Peuportier, J V Spadaro, A Zoughaib : « How to Account for CO2 Emissions from Biomass in an LCA », Int. J. LCA 12 (5) 281, 2007.
E. Johnson : « Goodbye to carbon neutral : Getting biomass footprints right », Environmental Impact Assessment Review, vol. 29, Issue 3, 165-168, 2009.
T. D. Searchinger, S. P.Hamburg, J. Melillo, W. Chameides, P Havlik, D M Kammen, G E Likens, R N Lubowski, M. Obersteiner, M. Oppenheimer, G. P. Robertson, W. H. Schlesinger, G. D. Tilman : « Fixing a critical climate accounting error », Science 326:527-528, 2009.
T. Walker, P. Cardellichio, A. Colnes, J. Gunn, B. Kittler, B. Perschel, C. Recchia, D. Saah : « Biomass Sustainability and Carbon Policy Study », Manomet Center for Conservation Sciences, NCI-2010-03, 2010.
J. McKechnie, S. Colombo, J. Chen, W. Mabee, H. L. MacLean : « Forest Bioenergy or Forest Carbon ? Assessing Trade-Offs in Greenhouse Gas Mitigation with Wood-Based Fuels », Environ. Sci. Technol. 45, 789-795, 2011.

******

Table des matières

Avant-propos **5**
Le fil conducteur **11**

I-Introduction **13**
II-Importance de la forêt dans le « budget » carbone de la planète **15**
III-La question du bois énergie **18**
IV-L'empreinte carbone de la forêt et de l'utilisation de son bois **22**
V-Le bois n'est pas un bon combustible **25**
VI-Comptabilité carbone de l'emploi du bois comme combustible **27**
VII-Puits de carbone de la forêt française métropolitaine **32**
VIII-Scénarios d'évolution **38**
IX-Conserver le bois récolté ? **49**
X-Conclusion **50**
Références bibliographiques **57**

Annexe A : Le bois est un combustible médiocre **63**
A-1 Composition centésimale du bois 63
A-2 Pouvoir calorifique du bois anhydre 64
A-3 Facteur d'émission intrinsèque 64
A-4 Comparaison avec les principaux combustibles fossiles 65
A-5 PCI et facteur d'émission du bois en fonction de son humidité 65
A-6 Émissions « amont » et émissions de combustion autres que le CO_2 66
A-7 Facteur d'émission « apparent » 67
A-8 Autres inconvénients du combustible bois 67
A-9 Conclusion 69
Références bibliographiques 71

Annexe B : Comptabilité carbone de l'utilisation du bois comme combustible **73**
B-1 Empreinte carbone du système [forêt+ bois] 74
B-2 La substitution du bois aux combustibles fossiles (et l'inverse) 83
B-3 Discussion : bilan de substitution par rapport à un scénario de non-exploitation de la forêt 88
B-4 Conclusion 92
Références bibliographiques 93

Annexe C : Puits de carbone forestier. Exemple de la forêt française métropolitaine **95**
C-1 Généralités 96
C-2 Stocks et flux de carbone 97
C-3 Puits de carbone forestier, puits de carbone total 111
C-4 Effets de substitutions 114
Références bibliographiques 119

Annexe D : Scénarios d'évolution **123**
D-1 Un modèle simple d'évolution des stocks et flux de carbone forestier 124
D-2 Empreinte carbone d'un supplément ponctuel de récolte 128
D-3 Un scénario « au fil de l'eau » 138
D-4 Scénario d'augmentation de récolte de bois pour l'énergie 145

D-5 Conserver le bois récolté ? 149
D-6 Conclusions 152
Références bibliographiques 155

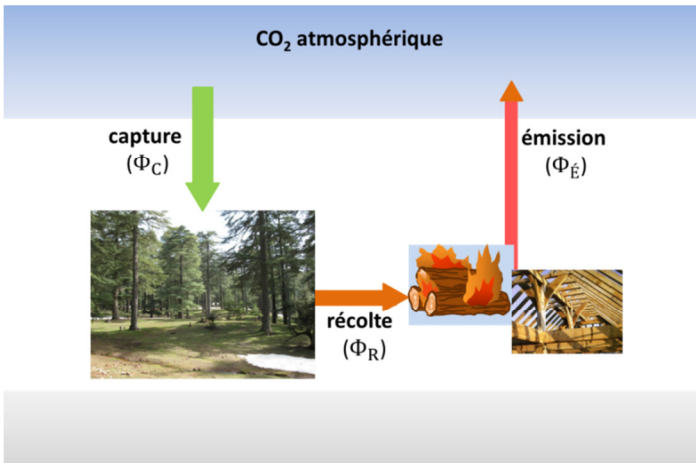
Appendice E : Rappels mathématiques 157

« Le fil conducteur »

La phrase-clé que l'on retrouve, à des nuances près, dans la presque totalité des textes en faveur des bioénergies est que « les émissions de carbone (ou de CO_2) résultant de la combustion de biomasse peuvent être ignorées tant que cette biomasse est renouvelée par une gestion durable des espaces agricoles ou forestiers ». Selon cet argument de **« neutralité carbone »**, la substitution de bois aux combustibles fossiles permettrait « d'éviter » les émissions liées à l'usage de ces derniers, ce qu'entérinent les politiques énergétiques et environnementales dans de nombreux pays, particulièrement en Europe, en infraction aux règles de comptabilité des gaz à effet de serre énoncées par le GIEC/IPCC (« Guidelines »).

Le bois, source d'énergie renouvelable et neutre vis-à-vis de l'effet de serre ? C'est à voir !

La figure 1 illustre les échanges de carbone entre la forêt et l'utilisation de son bois, d'une part, l'atmosphère d'autre part. L'étendue du domaine forestier considéré est quelconque : il peut s'agir d'un massif forestier particulier, de la forêt française entière ou de l'ensemble des forêts du monde.



Flux de carbone échangés entre l'atmosphère, d'une part, la forêt et les filières d'utilisation de son bois, d'autre part.

Le carbone constitutif de la biomasse forestière est puisé dans l'atmosphère (flux annuel **net** Φ_C). À la récolte de bois, correspond un flux annuel de carbone Φ_R. Une partie de la récolte est utilisée directement pour l'énergie, une autre est employée pour la fabrication de produits (bois d'œuvre et d'industrie). Combustion et décomposition des bois récoltés renvoient dans l'atmosphère, sous forme de dioxyde, un flux de carbone $\Phi_É$.

a) Selon ce schéma, la différence $\Phi_C - \Phi_É$ représente la masse nette de carbone annuellement échangée avec l'atmosphère par la forêt et les filières d'utilisation du bois récolté. Si $\Phi_C > \Phi_É$, la capture l'emporte sur l'émission : l'ensemble constitué par la forêt et les usages du bois joue le rôle de **puits de carbone**. Le rôle est celui de source dans le cas contraire ($\Phi_C < \Phi_É$). Il n'y a « neutralité » que si les flux émis $\Phi_É$ et capté Φ_C sont égaux, ce qui ne se conçoit que comme cas particulier ; encore faut-il souligner que la « neutralité » n'est pas un avantage lorsqu'il s'agit de lutter contre le changement climatique.

Dans ces conditions, partant de conditions initiales quelconques, **une augmentation de récolte** $\Delta\Phi_R$ **pour l'énergie** implique, avec $\Delta\Phi_É = \Delta\Phi_R$ et toutes choses étant maintenues égales par ailleurs, une diminution, d'amplitude $\Delta\Phi_R$, du puits de carbone $\Phi_C - \Phi_É$. L'emploi du bois récolté pour l'énergie ne se justifierait donc, vis-à-vis de l'impératif d'atténuation du changement climatique, que si l'émission de combustion était inférieure à celle d'autres combustibles disponibles, pour la même quantité de chaleur libérée. Ce n'est pas le cas : le bois est, de tous les combustibles carbonés, celui dont le facteur d'émission(*) est le plus élevé. Exprimé en tonne de carbone par tonne-équivalent-pétrole (tC/tep), le facteur d'émission intrinsèque du bois anhydre est de 1,13 tC/tep, à comparer à 1,09 tC/tep pour le charbon, 0,83 tC/tep pour le pétrole et 0,64 tC/tep pour le gaz naturel, par exemple. Les écarts relatifs entre ces valeurs de facteur d'émission ne sont guère modifiés par la prise en compte des émissions « amont » qui sont liées à l'exploitation, au transport, à la transformation, au conditionnement et à la distribution des combustibles. Par contre, les foyers à bois ont généralement des rendements inférieurs à ceux de leurs homologues à combustible fossile, ce qui creuse l'écart entre le facteur d'émission effectif du bois et celui de tout autre combustible. **La substitution du bois à un combustible fossile augmente donc les émissions** au lieu de les réduire ainsi qu'on le croit généralement.

b) Mais en outre, le supplément de récolte $\Delta\Phi_R$ supprime des arbres vifs et s'accompagne de pertes ligneuses et non ligneuses (bois mort abandonné sur coupe, feuillage et racines des arbres exploités, etc..). Le flux Φ_C qui est la différence entre la masse de carbone annuellement fixée dans la biomasse forestière et le flux de carbone rendu à l'atmosphère par la décomposition de la nécromasse, est donc en réalité affecté et, avec lui, le puits de carbone. L'évolution post-récolte de ce puits est dictée par la régénération de la forêt, d'une part, par la décomposition des pertes d'exploitation, d'autre part. L'analyse de cette évolution montre que, globalement, l'émission consécutive à une augmentation de récolte peut être sensiblement supérieure au contenu carbone de celle-ci, particulièrement dans le cas où le bois récolté est destiné à l'énergie.

c) Aussi doit-on considérer la récolte (et en amont, la gestion forestière) selon le rapport utilité/coût carbone. Il est normal d'exploiter la forêt pour en tirer les biens nécessaires et maintenir son dynamisme, mais il faut avoir conscience du coût carbone de chaque action. Il est ainsi déraisonnable d'orienter la production forestière vers la fourniture d'énergie alors qu'on dispose de sources de chaleur non-carbonées ou moins carbonées et que la substitution du bois aux combustibles fossiles se traduit par une augmentation des émissions. Sans les augmentations de récolte pour l'énergie actuellement prévues, l'évolution naturelle du puits de carbone forestier rendrait la France « neutre » en CO_2 et probablement « puits net » vers 2050, pourvu que l'objectif de division par 4 des émissions « fossiles » soit réalisé. **Considérer la forêt comme le substitut « vert » d'une mine de charbon est une grave erreur !**

(*) facteur d'émission : masse de carbone émise par unité de chaleur dégagée.

FORÊT, BOIS, CO_2
Le bois énergie mis en question

« *Le discours sur l'énergie gagnerait en pertinence s'il s'appuyait mieux sur les données scientifiques qui sous-tendent sa "production" et son emploi et qui sont trop fréquemment ignorées par les médias ou par les politiciens. Le physicien s'irrite souvent devant des affirmations simplistes en contradiction avec des ordres de grandeur qui devraient être connus de tous* »

(Roger Balian, Physicien théoricien, Académie des Sciences)

I - Introduction

La forêt peut jouer un rôle majeur dans l'atténuation du changement climatique, mais l'emploi de son bois pour produire de l'énergie tend à y faire obstacle.

L'accumulation de dioxyde de carbone (CO_2) dans l'atmosphère contribue aujourd'hui à hauteur des deux-tiers au changement du bilan radiatif de la Terre et, consécutivement, à son réchauffement global à terme. Suivant l'évolution constatée au cours des précédentes décennies, si rien n'était fait pour la contrarier, l'augmentation de température moyenne à la surface du globe dépasserait 4°C à la fin de ce siècle et, au-delà, compromettrait l'avenir même de la biosphère. Il n'y a d'autre issue que de rééquilibrer le bilan radiatif, autant que possible et aussitôt que possible, soit, en ce qui concerne le carbone, réduire son émission et accroître sa capture dans l'atmosphère (Monsieur de La Palice parviendrait à la même conclusion). En ce qui concerne le premier plateau de la balance, l'émission, il y a accord, au moins en principe, sur une réduction drastique de la consommation des combustibles fossiles. L'autre plateau, la capture indispensable à l'équilibre, est, curieusement, généralement ignoré dans les discours actuels de politique environnementale. Pourtant, le verdict du GIEC/IPCC est clair : les scénarios permettant de limiter le réchauffement global vers la fin du siècle à 2°C par rapport à l'époque préindustrielle se caractérisent par une réduction de 40 à 70 % des émissions anthropiques de gaz à effet de serre vers 2050, par rapport à 2010, et par un niveau d'émission global proche de zéro ou inférieur en 2100 (IPCC 2014a) ; c'est bien un niveau d'émission nette négatif qui est requis vers la fin du siècle et au-delà, la capture devant l'emporter sur l'émission brute.

Des deux « puits » permettant la capture du carbone atmosphérique, l'océan et la végétation terrestre, seul le second, dans lequel la forêt joue le rôle principal, offre un moyen d'action crédible. Le principe est connu : la photosynthèse de matière ligneuse emprunte le carbone à l'atmosphère et

la conservation du bois, en forêt dans les arbres sur pied ou, hors forêt, sous forme brute ou transformée, permet de stocker environ 500 kilogrammes de carbone par tonne sèche, c'est-à-dire de capturer près d'une tonne de CO_2 par mètre-cube de produit. Il y a donc tout intérêt à renforcer la composante forestière du puits de carbone terrestre, ce qui implique l'arrêt de la déforestation, l'extension au contraire des surfaces boisées, l'accroissement des volumes sur pied dans les forêts existantes et l'emploi du bois récolté pour les usages les plus durables possibles, non comme combustible.

Or, le développement des usages énergétiques de la biomasse, du bois notamment, est paradoxalement prôné, depuis environ deux décennies, comme l'un des principaux vecteurs d'une transition vers une économie « neutre en carbone ». Il y a pourtant évidente antinomie des rôles de puits de carbone et de source d'énergie combustible renouvelable que l'on demande aux forêts et à leur production ligneuse de jouer : le bois ne peut retenir le carbone qu'il a emprunté à l'atmosphère que si on ne le brûle pas ! La promotion du « bois énergie » pour des raisons environnementales est donc inconséquente : tout gramme de CO_2 émis en quelque endroit que ce soit de la planète, quelle qu'en soit la source, biomasse ou fossile, ayant le même effet sur le climat, il n'y a pas de raison de penser que l'émission par combustion de biomasse puisse être moins nocive que les autres émissions. Plus grave : le bois étant en réalité le plus mauvais des combustibles du point de vue de l'émission de CO_2 rapportée à l'énergie fournie (facteur d'émission), son usage à la place de combustibles fossiles ne fait qu'accroître le déficit de la balance carbone.

L'argument utilisé par les artisans du bois énergie pour contourner cette difficulté est celui de la « neutralité carbone », concept fragile et trompeur, néanmoins devenu dogme, légal de surcroît. Celui-ci affirme que l'émission du bois utilisé comme combustible se trouve compensée, dans le cadre d'une gestion durable des forêts, par la capture du CO_2 nécessaire à l'élaboration, par photosynthèse, de la matière ligneuse. L'argument, malgré sa fragilité, est devenu postulat dans nombre de textes législatifs ou réglementaires, soustrayant de fait la forêt et l'utilisation de son bois à une comptabilité carbone généralement exigée pour toute activité humaine, et encourageant abusivement la consommation de bois énergie au détriment des usages durables du bois et de la croissance du capital ligneux. Et la question d'une gestion des forêts propre à atténuer le changement climatique se trouve, dans ce cadre conceptuel de «neutralité carbone», éludée par avance.

Ce mémoire a pour objet de remettre en perspective le rôle potentiel, peut-être décisif, des forêts dans la lutte contre le changement climatique, en purgeant de leurs principales erreurs les argumentaires couramment admis. La détermination de l'empreinte carbone des utilisations énergétiques du bois, en prenant en compte les véritables propriétés du bois combustible, la dynamique de croissance ou de reconstitution des forêts qui le produisent et les crédits (ou débits) de substitution vis-à-vis des autres sources d'énergie, appuie les conclusions d'un nombre croissant d'auteurs qui font apparaître les politiques énergétiques actuellement menées relativement à l'utilisation de la biomasse forestière, notamment en Europe, comme fondamentalement contre-productives. En se libérant du cadre arbitraire de la « neutralité carbone », on peut (et on doit) envisager pour la forêt d'autres stratégies d'atténuation du changement climatique que celle de la fourniture d'énergie.

II - Importance de la forêt dans le « budget » carbone de la planète

La concentration de CO_2 dans l'atmosphère qui était de 280 parties par million (ppm) au début de l'ère industrielle (1750), a dépassé les 400 ppm en 2016 et continue d'augmenter annuellement d'environ 2 ppm (Le Quéré et coll. 2016). Pour limiter à 2°C l'élévation de la température par rapport à son niveau de l'époque préindustrielle, la concentration en équivalent-CO_2 de l'ensemble des gaz à effet de serre devrait être maintenue en dessous de 450 à 500 ppm à la fin de ce siècle (IPCC 2014a). L'augmentation de la concentration de CO_2 est donc critique. Elle serait plus importante encore si ne jouaient des « puits » de carbone, océanique (dissolution du CO_2 dans les eaux superficielles) et terrestre (capture par l'activité photosynthétique de la végétation et stockage du carbone, notamment dans les écosystèmes forestiers). Ces « puits » compensent un peu plus de la moitié des émissions.

La figure 1 présente, selon le « Global Carbon Project », le budget carbone annuel de la planète moyenné sur la période 2006-2015 (Le Quéré et coll. 2016). Seul le carbone sous forme de CO_2 est ici concerné, le méthane (CH_4), avec d'autres gaz à effet de serre importants, faisant l'objet de bilans particuliers. Dans ce qui suit, la distinction entre carbone (C) et dioxyde de carbone (CO_2) est implicite, avec la correspondance de masse : 12 grammes de C ≈ 44 grammes de CO_2.

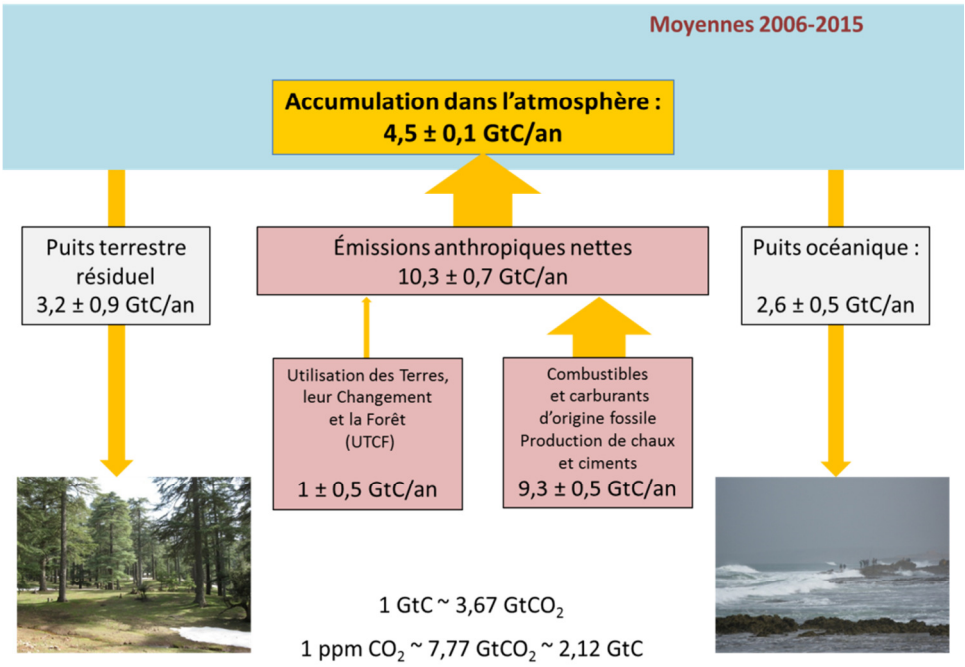


Figure 1 - Budget carbone de la planète selon le Global Carbon Project (Le Quéré et coll. 2016)
(moyennes 2006-2015 des émissions et captures de carbone atmosphérique)

Les différents postes du budget sont les suivants :

- Les émissions provenant de la consommation de combustibles et carburants d'origine fossile et de la production de chaux et ciments : 9,3 ± 0,5 gigatonnes de carbone par an (GtC/an).
- Les flux de carbone anthropiques liés à la déforestation, aux boisements et reboisements, à la dégradation des forêts et à l'exploitation forestière, à l'utilisation des bois récoltés, à la

conversion des sols dont le contenu en carbone dépend de leur destination (forêt, prairie, terre cultivée....), etc., c'est-à-dire la somme algébrique des émissions et captures liées à l'Utilisation des Terres, leur Changement et la Forêt (UTCF) : 1 ± 0,5 GtC/an.

- L'augmentation de la masse de carbone dans l'atmosphère qui, mesurée directement, est connue avec une bonne précision : 4,5 ± 0,1 GtC/an. Cette augmentation est inférieure de moitié à la somme des émissions précédentes grâce aux « puits de carbone » terrestre et océanique. En termes de concentration de CO_2, cette augmentation se chiffre à environ 2 ppm/an.

- Le puits océanique qui a pour origine la dissolution du CO_2 atmosphérique dans les eaux superficielles, est estimé à 2,6 ± 0,5 GtC/an à partir d'observations indirectes et de modèles d'échange océan-atmosphère soumis aux conditions météorologiques observées.

- Le puits terrestre reste mal défini. Il est évalué comme le résidu des autres termes du budget, soit 3,2 ± 0,9 GtC/an. Il correspond, les émissions « UTCF » étant comptées à part, à la somme algébrique des émissions et captures de CO_2 d'origine non anthropique dans les écosystèmes terrestres. L'importance de ce puits a pour raison principale, selon les auteurs, une augmentation générale des stocks de carbone dans la biomasse végétale et dans les sols, attribuée notamment aux effets fertilisants du CO_2 atmosphérique et des dépôts azotés, ainsi qu'à l'allongement de la durée de végétation lié au changement climatique.

Ainsi présenté, le « budget » est conforme, par l'affichage des émissions « UTCF », aux règles de comptabilisation des émissions de CO_2 de la Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (CCNUCC). Ces règles ne sont malheureusement pas toujours très claires, leur format « sectoriel » conduisant à disperser sous différentes rubriques des émissions originellement de même nature ou à réunir dans une même rubrique des émissions et des captures, ce qui nuit à la visibilité de sources de carbone importantes. Pour ce qui concerne la forêt et le bois, on relève ainsi que le total des « émissions UTCF » (≈1GtC/an) est un chiffre net, en réalité différence entre des émissions (déforestation, dégradation des forêts, combustion ou décomposition d'une partie des récoltes ligneuses...) et des captures (boisements, reboisements, accrues, régénérations après coupe, stockage de carbone dans les produis bois...), les parts réelles (brutes) des unes et des autres restant cachées ; pour ce qui est des captures, la frontière entre « puits terrestre résiduel » et « secteur UTCF » est, par ailleurs, ténue. Des répartitions différentes, plus explicites, peuvent être envisagées sans modifier, bien sûr, le résultat final.

Selon Houghton et coll. (2012), le total des émissions brutes « UTCF » serait, en ordre de grandeur, trois fois supérieur à celui des émissions nettes, soit ≈ 3 GtC /an, celui des captures étant ≈ 2 GtC /an par conséquent. Il est difficile d'être précis sur le détail de ces émissions et captures, les données collectées par la FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations) auprès des États Membres, sur lesquelles sont appuyées les analyses, n'étant complètes et fiables que dans les pays disposant de services d'inventaire forestier, et les observations satellitaires restant partielles (occupation des sols, étendue des feux de forêts). Il est certain, néanmoins, que la forêt et l'utilisation de son bois ont le rôle principal : la part de l'agriculture et de l'élevage dans les émissions de gaz à effet de serre est importante, en termes d'équivalent-CO_2, par le méthane et le protoxyde d'azote, mais les émissions de dioxyde de carbone restent marginales et sont généralement

négligées dans les statistiques (FAO 2014). Selon la FAO (Federici et coll. 2015), la déforestation contribuerait aux émissions à hauteur de 3,9 et 2,9 $GtCO_2$/an en moyenne pour les périodes 2001-2010 et 2011-2015 respectivement, d'où, par interpolation linéaire, une estimation de 3,3 $GtCO_2$/an (0,9 GtC/an) pour la période 2006-2015 considérée ici. Toujours selon la FAO (2016), la moyenne du volume récolté est de 3,7 milliards de mètres cubes par an correspondant à un contenu carbone de 1GtC/an selon l'équivalence usuelle d'une tonne de CO_2 par mètre-cube de bois ; comme l'augmentation du stock de carbone dans les produits bois en usage ou placés en décharge en fin de vie est de peu supérieure à 0,1 GtC/an (ibid.), l'émission par combustion (bois énergie, valorisation énergétique des déchets de l'industrie du bois et des produits bois en fin de vie) ou décomposition (déchets et produits bois abandonnés en décharge) serait proche de 0,9 GtC/an. Les émissions consécutives à l'exploitation forestière (décomposition des rémanents, principalement), estimées à environ 50% du contenu carbone des récoltes (cf. annexe D), soit 0,5 GtC/an, s'ajoutent à ce dernier chiffre. Les émissions liées à la dégradation des forêts, c'est-à-dire à la réduction de leur stock de carbone par des causes anthropiques telles que cultures itinérantes, pâturage dans les espaces boisés, coupes illégales et collecte incontrôlée de bois de feu... doivent correspondre au complément de 0,7 GtC/an pour atteindre le total d'émissions de 3 GtC/an. Ces chiffres sont tous affectés de marges d'incertitude importantes et ne doivent être considérés que dans leurs ordres de grandeur.

Le budget peut alors être présenté différemment en regroupant l'évaluation des captures « UTCF » avec celle du puits terrestre « résiduel », ce qui fait apparaître, d'une part, un puits terrestre effectif correspondant à la production primaire nette des écosystèmes terrestres, d'autre part, les émissions brutes anthropiques du secteur UTCF, dont la quasi-totalité a pour sources la forêt et l'utilisation de son bois (Figure 2). La marge d'incertitude affectant le total « UTCF » précédent (± 50%) est conservée pour les émissions brutes.

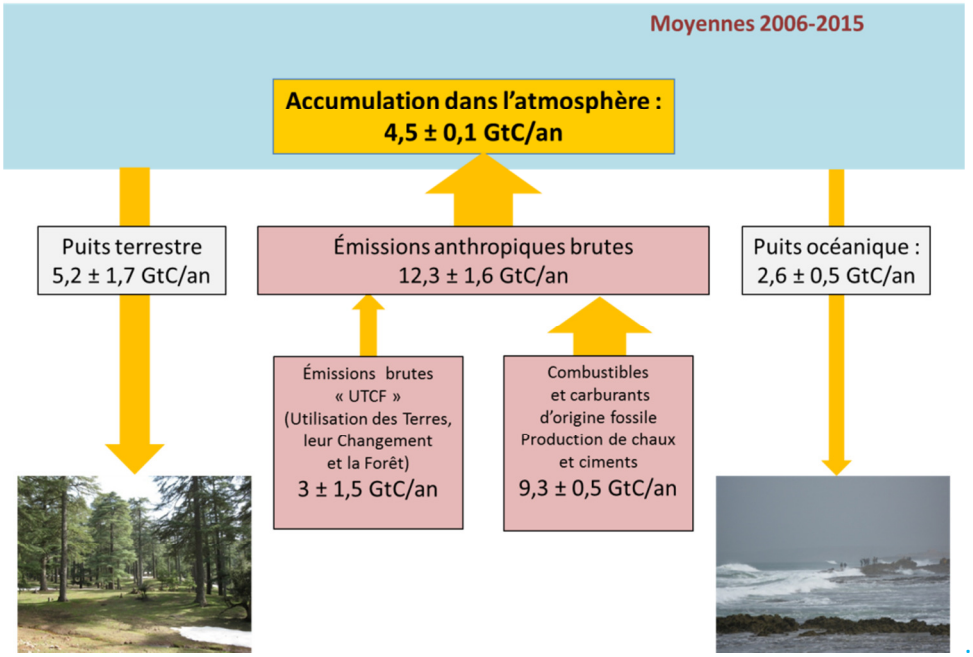


Figure 2 - Budget carbone de la planète réarrangé pour isoler les émissions brutes « UTCF »

Cette nouvelle présentation du même budget souligne l'importance de la forêt et de l'utilisation de son bois pour l'atténuation du changement climatique :

- Les émissions en provenance de la forêt (3 GtC/an) représentent actuellement près de 25% du total des émissions anthropiques de CO_2. La déforestation intervient pour environ 0,9 GtC/an, l'oxydation d'une grande partie du bois récolté (combustion ou décomposition) pour 0,9 GtC/an également. Ce dernier chiffre doit être augmenté de 0,5 GtC/an pour tenir compte de la décomposition des rémanents d'exploitation, ce qui élève à 1,4 GtC/an la contribution des prélèvements en forêt. La dégradation des forêts intervient enfin pour environ 0,7 GtC/an.

- Par contre, les écosystèmes terrestres, dans lesquels la forêt joue le rôle principal, constituent un puits de carbone estimé à 5,2 GtC/an, le double du puits océanique, permettant de compenser 55 % des émissions de carbone fossile, et encore plus de 40% des émissions anthropiques totales.

- Les chiffres indiqués sur la figure 2 indiquent que pour stopper l'accumulation de CO_2 dans l'atmosphère, une division par deux des émissions de carbone fossile pourrait suffire, sous réserve que l'efficacité des « puits » terrestre et océanique se maintienne jusqu'à réalisation et au-delà. Tel est effectivement l'objectif de l'Organisation des Nations Unies pour 2050, le souci d'équilibrer les efforts entre pays développés et pays en voie de développement impliquant pour les premiers un facteur de réduction des émissions plus important, division par 4 pour la France (CGEDD 2013). Si cet objectif venait à être atteint, les écosystèmes terrestres, principalement les écosystèmes forestiers qu'il est plus facile de contrôler que le « puits » océanique, deviendraient le premier facteur de régulation de la concentration de CO_2 dans l'atmosphère.

En conséquence, si la modération de l'effet de serre nécessite une stricte économie de combustibles fossiles, le renforcement du puits de carbone terrestre doit être envisagé comme complément ou alternative. Ce renforcement passe logiquement par l'arrêt de la déforestation, l'augmentation des volumes ligneux dans les forêts existantes et dans les produits bois durables, ainsi que le rétablissement des forêts, landes, prairies et tourbières sur les espaces qui ne sont pas indispensables aux activités humaines. Quant aux usages énergétiques du bois, si on excepte ceux de « nécessité » dans les pays en voie de développement, ils ne se justifieraient, devant la menace climatique, que si la substitution du bois aux combustibles fossiles permettait une réduction d'émission, ce qui n'est pas le cas. Au contraire, comme cela est démontré dans les annexes A, B et D ces usages pèsent lourdement dans le budget carbone de la planète et il importe de les réduire.

III - La question du bois énergie

Parmi les conclusions précédentes, celle d'une réduction des usages du bois pour l'énergie s'oppose à la conception courante selon laquelle le bois, et la biomasse en général, constitueraient une ressource renouvelable, sans impact vis-à-vis de l'effet de serre, qui pourrait donc être substituée avec avantage aux combustibles fossiles. La phrase-clé que l'on retrouve, à des nuances près, dans la presque totalité des publications en faveur des bioénergies est que « les émissions de carbone (ou de CO_2) résultant de la combustion de biomasse peuvent être ignorées tant que cette biomasse est

renouvelée par une gestion durable des espaces agricoles ou forestiers » (cf. par exemple, en vrac : ADEME & MEEDM 2009, AF&PA 2015, WBCSD 2015, Forestry Commission 2015, etc...)

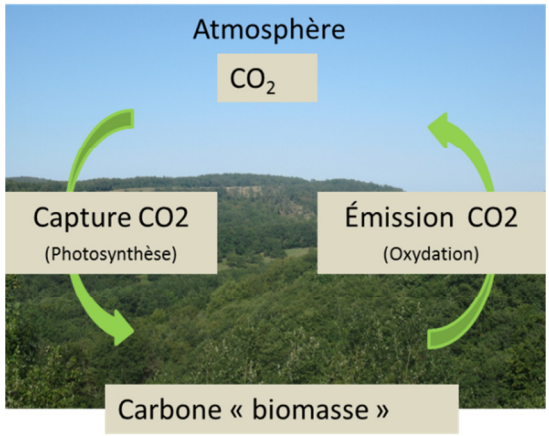


Figure 3 - Illustration du cycle du carbone « biogénique »
Ce cycle (contesté) est à la base du concept de neutralité carbone de la biomasse

Cette conception de « neutralité carbone » des usages de la biomasse pour la production d'énergie repose sur l'hypothèse d'un cycle **équilibré** dans lequel la masse de CO_2 atmosphérique capturée par la végétation, correspond globalement, année après année, à celle qui est émise par la combustion ou la décomposition, plus précisément l'oxydation, de la matière organique produite (Figure 3). Il s'agit là d'un cas particulier possible mais qui, affirmé comme postulat par les promoteurs des bioénergies, conduit à des conclusions privées de réalité. Les principales sont les suivantes :

- Le cycle du carbone « biomasse » fonctionnerait, vis-à-vis de l'effet de serre, indépendamment du cycle du carbone global, en contradiction avec le principe rappelé dans l'introduction selon lequel tout gramme de CO_2 émis en quelque endroit de la planète, quelle qu'en soit la source, biomasse ou fossile, a le même effet sur le climat, en contradiction aussi avec l'évidence que la photosynthèse ne fait pas de distinction entre carbone « biogénique » et carbone « fossile »

- La forêt n'aurait aucun échange net de carbone avec l'atmosphère : elle ne pourrait être ni source ni puits, ce qui est contredit par le budget carbone résumé dans le paragraphe précédent

- Corrélativement, le stock de carbone dans la biomasse forestière et les produits récoltés serait invariable (s'il variait, il s'accompagnerait nécessairement d'un flux de CO_2 émis ou capté, en contradiction avec l'assertion de neutralité). Cette vision de la forêt et de l'utilisation de son bois est donc purement statique : la variable « temps » n'intervient pas. Par suite, on ne peut affirmer la neutralité carbone des usages énergétiques du bois que pour des forêts productrices gérées, de manière stricte, à stock constant : la « neutralité carbone » n'est pas une propriété intrinsèque du bois, mais le résultat d'une gestion particulière. Le concept est donc fragile....

- On présuppose aussi qu'il n'y a pas d'autre emploi possible pour le bois que la combustion, car si on conservait le bois produit, la masse de carbone stocké augmenterait au fil du temps,

et le cycle ne serait plus équilibré, la capture l'emportant alors sur l'émission ; en faisant de la « neutralité » un axiome, on occulte la « positivité carbone » du bois que l'on ne brûle pas. Le concept est donc trompeur...

- Lorsqu'on admet comme vérités établies que la ressource ligneuse est renouvelable et que l'impact de son usage énergétique est « neutre » vis-à-vis de l'effet de serre, on est amené à conclure que la substitution du bois aux combustibles fossiles « évite » les émissions qu'entraîne l'emploi de ces derniers. Dans ce raccourci, étonnamment, les propriétés physiques des combustibles (essentiellement pouvoir calorifique et facteur d'émission de CO_2) ne sont pas prises en compte.

La neutralité carbone est donc un cas particulier dont d'ailleurs jamais personne ne s'assure sur le terrain.

L'assertion de neutralité, malgré sa naïveté, est devenue un « credo » partagé par la majorité des acteurs des mondes politique, économique et même écologique, et acté dans nombre de textes législatifs ou règlementaires, notamment en Europe. Rabl et coll. (2007) puis Johnson (2009) ont été parmi les premiers auteurs à avoir alerté la communauté scientifique, en relevant que la plupart des publications relatives à l'empreinte carbone ou à l'analyse du cycle de vie des biocarburants et biocombustibles excluaient systématiquement les émissions de CO_2 provenant de leur usage. Depuis, malgré de nombreuses mises en garde (Searchinger et coll. 2009 ; Leturcq 2011 ; EEA 2011 ; McKechnie et coll. 2011 ; Haberl et coll. 2012; Schulze et coll. 2012 ; Agostini et coll. 2013 ; Leturcq 2014 ; Ter-Mikaelian et coll. 2015 ; Brack 2017 ; etc...), le développement des bioénergies comme alternative à l'emploi des énergies fossiles est toujours présenté comme un moyen d'atténuation du changement climatique et, dans la plupart des pays disposant de ressources forestières, les politiques énergétiques encouragent l'utilisation du bois pour le chauffage individuel ou collectif, le chauffage industriel et même la production d'électricité sans évaluation préalable de l'impact « effet de serre » de cette utilisation puisqu'elle est prétendue « neutre » a priori.

Des simplifications comptables maladroites ou mal interprétées se trouvent probablement à l'origine de ce qu'il faut bien appeler une erreur critique (Searchinger et coll. 2009, Haberl et coll. 2012). En application de la Convention-Cadre des Nations-Unies sur le Changement Climatique, (UNFCCC United Nations Framework Convention on Climate Change) des règles de comptabilité « carbone » ont été édictées pour établir des bilans nationaux d'émission de gaz à effet de serre. Pour éviter des erreurs de double compte, il a été décidé de rapporter les émissions de CO_2 par combustion de bois et autres biomasses non dans la rubrique « énergie » mais dans le secteur « UTCF » (Utilisation des Terres, leur Changement et la Forêt, « LULUCF » Land Use, Land Use Change & Forestry) au même titre que la déforestation et autres prélèvements de bois (IPCC 1996a, IPCC 2006). Ces émissions, alors noyées dans le total des émissions et captures « UTCF », perdent toute visibilité, accréditant l'idée, en quelque sorte « par défaut », que les usages énergétiques de cette biomasse sont neutres vis-à-vis de l'effet de serre, et la schématisation excessive de la figure 3 fournit un semblant de justification. L'IPCC note d'ailleurs dans son cinquième rapport, un peu tardivement et timidement, que « *the neutrality perception is linked to a misunderstanding of the guidelines for GHG inventories...* » (IPCC 2014b, cf. note en bas de page 879 ; voir aussi : http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/faq/faq.html).

Les conséquences sont lourdes; les principales sont les suivantes :

- La « neutralité carbone de la biomasse » a été entérinée par les rédacteurs de la plupart des recommandations, réglementations et directives en matière de politiques énergétiques. Ainsi, en Europe, sont déclarés « nul » le facteur d'émission de la biomasse, contre toute évidence physique (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, Annexe IV, Journal officiel de l'Union européenne, 25.10.2003, page L 275/44), et « nulles » aussi les émissions « à l'usage » des biocarburants et bioliquides (Directive 2009/28/CE du Parlement européen et du Conseil du 23 avril 2009 relative à la promotion de l'énergie produite à partir de sources renouvelables, Annexe V, section C, alinéa 13, Journal officiel de l'Union européenne, 5.6.2009, page L 140/55), ce qui permet un développement inconsidéré et incontrôlé des usages énergétiques de la biomasse, sans égard pour les dommages causés aux écosystèmes producteurs et pour l'impact « effet de serre ». Notamment, ces usages ne sont soumis ni à la taxe carbone ni aux permis d'émission (quotas CO_2).

- Les pays développés (Annexe I du protocole de Kyoto) n'ont pas à déclarer les émissions de combustion de biomasse importée, cependant que les pays en voie de développement, de leur côté, ne sont pas contraints de soumettre à limitation les variations de leur stock de carbone forestier ; les premiers peuvent ainsi impunément puiser dans les forêts des seconds pour produire de l'énergie et libre cours est laissé aux actions de déforestation en faveur de cultures énergétiques (Searchinger et coll. 2009).

- L'utilisation de bois ou autres biomasses en substitution de combustibles fossiles est réputée « éviter » les émissions de combustion de ces derniers, alors qu'en réalité on ne fait que remplacer les émissions de ceux-ci par celles de ceux-là, en ignorant, de fait, si cette substitution présente un avantage ou non, et dans quelles conditions.

- La notion de « neutralité » est même souvent appliquée aux produits bois, en considérant que les bois œuvrés ne font que remplacer au fur et à mesure ceux qui parviennent en fin de vie, se dégradent ou sont brûlés. Ainsi, jusqu'à une date récente (2013), la recommandation pour les déclarations d'émission de gaz à effet de serre était de considérer, « par défaut », que « tout le carbone de la biomasse récoltée est oxydé l'année même du prélèvement » (IPCC 1996b). Cette disposition ne peut avoir favorisé les emplois durables du bois par rapport aux usages combustibles.

Le concept de « neutralité carbone de la biomasse » est cependant devenu, depuis une dizaine d'années, un sujet polémique. Le nombre de publications contestataires est en croissance mais parallèlement s'élaborent, chez les tenants des bioénergies, des stratégies de contournement qui font craindre que les abus ne perdurent (cf. par exemple la section 3 de l'annexe B). Il suffit d'une recherche sur « Google » avec les mots clés : neutralité carbone biomasse bois (ou wood biomass carbon neutrality) pour comprendre que le mythe de « neutralité » est cependant ébranlé et que les règles du jeu doivent être changées.

Il n'y a d'autre voie, pour trancher, que de chiffrer de manière aussi complète et précise que possible l'empreinte carbone de l'utilisation du bois comme combustible et de la comparer, sur la base de l'unité d'énergie rendue, avec les empreintes carbone des autres sources. C'est la compétition avec les fossiles qui intéresse en premier lieu, car il est bien compréhensible que, sans la miraculeuse « neutralité carbone », le bois et autres biomasses seraient disqualifiés, pour un usage combustible, devant les sources d'énergie non carbonées (nucléaire, hydraulique, éolienne, solaire thermique, solaire photovoltaïque, marine etc..).

IV - L'empreinte carbone de la forêt et de l'utilisation de son bois

La figure 4 pose le problème de manière moins caricaturale que la figure 3. L'ensemble forestier considéré est quelconque : il peut s'agir d'un massif forestier particulier, pourvu qu'il soit constitué de peuplements suffisamment diversifiés en essences et en âges, de plusieurs massifs, de la forêt française toute entière ou de l'ensemble des forêts du monde.

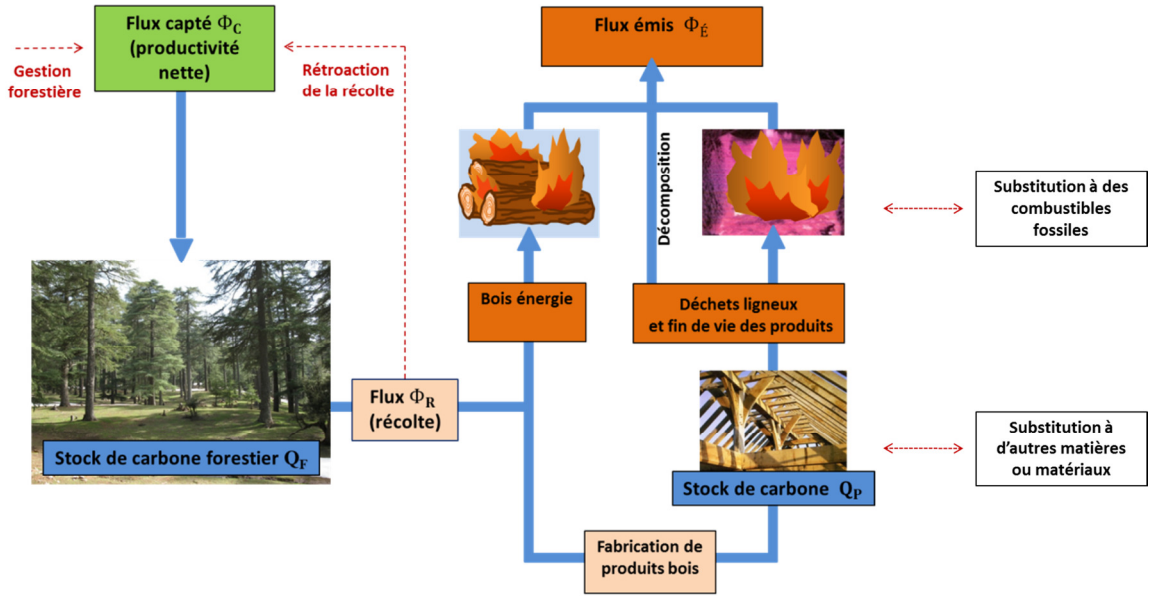


Figure 4 - Stocks et flux de carbone dans la forêt et les filières d'utilisation du bois.

Le flux net de carbone Φ_C capté dans l'atmosphère (ou celui de CO_2) correspond à la productivité nette de l'écosystème considéré, c'est-à-dire à la différence entre le flux de carbone constitutif de la biomasse forestière et le flux de carbone rendu à l'atmosphère par la décomposition de la nécromasse. Le carbone capturé se répartit dans différents compartiments dont les principaux sont les arbres vivants (tronc, branches, feuilles et racines), le bois mort sur pied ou au sol, les racines mortes, la végétation du sous-bois, la litière, le sol. À la récolte de bois correspond un flux de carbone Φ_R qui alimente les filières d'utilisation. Le stock de carbone forestier Q_F, somme des stocks contenus dans les différents compartiments énumérés ci-dessus, intègre la différence entre les flux Φ_C et Φ_R. Une partie de la récolte est utilisée directement pour l'énergie, le reste est employé pour la fabrication de produits (bois d'œuvre et d'industrie). Les déchets ligneux de fabrication et les produits bois hors d'usage servent généralement de combustible ou, placés en décharge, finissent

par se décomposer, renvoyant dans l'atmosphère un flux de carbone qui s'ajoute à celui issu de la combustion. Le stock de carbone Q_P des produits bois (y compris ceux qui sont abandonnés ou placés en décharge) intègre la différence entre le flux associé à la récolte Φ_R et le flux d'émission $\Phi_É$ (combustion et décomposition). Les flux Φ sont définis, en matière forestière, sur un « pas de temps » Δt d'une année ; en conséquence, les valeurs pertinentes de stock Q sont celles observées en fin de saison de végétation. La durée séparant l'exploitation forestière de l'utilisation du bois récolté est généralement courte devant les temps caractéristiques de la dynamique forestière : confondre l'année de récolte et celle de combustion du bois ou de fabrication de produits n'a que peu d'incidence sur la valeur de l'empreinte carbone.

Si l'on compte à part les émissions de gaz à effet de serre dites « amont » qui sont liées aux opérations de sylviculture, à l'exploitation forestière, au transport des bois, à leur conditionnement , à la fabrication des produits bois, à la mise à disposition au lieu d'utilisation, etc., ainsi que les émissions de combustion autres que le CO_2 (notamment le méthane), la différence $\Phi_C - \Phi_É$ représente la balance capture-émission intrinsèque annuelle de la forêt et de l'utilisation du bois récolté. Si $\Phi_C > \Phi_É$, le stock de carbone total $Q_F + Q_P$ s'accroît, l'ensemble constitué par la forêt et l'utilisation de son bois joue le rôle de puits de carbone vis-à-vis de l'atmosphère. La forêt et ses usages deviennent une source nette d'émission dans le cas contraire ($\Phi_C < \Phi_É$). Il n'y a « neutralité » que si les flux émis $\Phi_É$ et capté Φ_C sont égaux, ce qui ne peut se concevoir que de manière fortuite et transitoire, sauf si on régule très précisément la productivité nette, par la gestion forestière, pour qu'il en soit ainsi ; encore faut-il souligner que la « neutralité » n'est pas à proprement parler un avantage lorsqu'il s'agit de lutter contre le changement climatique.

Le schéma de la figure 4 fait apparaître d'emblée que l'usage du bois comme combustible est contreproductif vis-à-vis d'un objectif de limitation de l'effet de serre. Supposons en effet que pour répondre à une demande nouvelle d'énergie, on doive augmenter la récolte, en termes de flux de carbone, d'une quantité $\Delta\Phi_R$. Puisque le bois récolté sert de combustible, le flux émis est augmenté également $\Delta\Phi_É = \Delta\Phi_R$ en sorte que, si toutes choses restaient égales par ailleurs, le puits de carbone $\Phi_C - \Phi_É$ serait diminué de cette même quantité. Il n'y aurait donc intérêt à substituer du bois à d'autres combustibles que si l'émission de ces derniers, alors évitée, était supérieure à $\Delta\Phi_R$: ce n'est pas le cas, car c'est le bois qui, de tous les combustibles, a le facteur d'émission le plus élevé (le facteur d'émission est le rapport du contenu carbone à l'énergie rendue lors de la combustion, cf. section suivante). Mais, en outre, la récolte s'accompagne de la suppression d'arbres producteurs, de pertes ligneuses et non ligneuses, vouées à décomposition, et d'évasion de carbone, à partir de la litière et du sol notamment. Il en résulte que la productivité nette Φ_C est généralement elle-même réduite, au moins de manière transitoire, aggravant le déficit « carbone » de la substitution énergétique.

L'impact négatif du prélèvement sur le puits de carbone forestier existe bien sûr de la même manière quelle que soit la destinée du bois récolté mais son acceptation peut être justifiée, cas par cas, par des raisons de bonne gestion forestière, par l'utilité des produits, par le stockage de carbone hors forêt, ou par les éventuelles économies d'énergie et de gaz à effet de serre permises par des substitutions de produits bois à des produits réalisés avec d'autres matériaux, non par le remplacement des combustibles fossiles qui se traduit immanquablement et inutilement par une augmentation des émissions, quel que soit le combustible substitué. Le moyen le plus direct pour

accroître le puits de carbone forestier reste l'augmentation de la productivité nette Φ_C, par des boisements, reboisements et par des soins sylvicoles propres à dynamiser les peuplements en place.

Dans le détail quantitatif, les choses sont plus compliquées. La forêt et l'utilisation de son bois constituent un système dynamique obéissant à une loi de conservation qui exprime simplement que l'accroissement ou la diminution $\Delta(Q_F + Q_P)$ du stock de carbone par unité de temps Δt (l'année en matière forestière) résulte de la différence entre les flux annuels « entrant » Φ_C et « sortant » $\Phi_É$:

$$\Delta(Q_F + Q_P)/\Delta t = \Phi_C - \Phi_É \quad (1)$$

L'évolution de ce système à partir de conditions initiales qui restent à préciser cas par cas, dépend donc essentiellement (i) des demandes en bois énergie et en produits bois plus ou moins durables, celles-ci déterminant le volume de récolte annuelle et son contenu carbone (Φ_R), ainsi que les émissions de CO_2 ($\Phi_É$), (ii) des variations de la productivité nette (Φ_C) en réaction à la récolte elle-même (« rétroaction ») ou à des décisions de gestion (boisement, reboisement, enrichissement etc.). L'empreinte carbone est définie, sur une période de temps donnée, comme la somme ∑ des balances annuelles capture-émission $\Phi_C - \Phi_É$; en conséquence, selon l'équation (1), la variation du stock total $Q_F + Q_P$ sur la période est la mesure des échanges de carbone entre la forêt et l'utilisation de son bois, d'une part, l'atmosphère, d'autre part. Pour une période courant d'une année origine 0 à une année n, l'empreinte carbone intrinsèque $E_{0\to n}$ du système [forêt + bois] s'écrit ainsi :

$$E_{0\to n} = Q_{Fn} + Q_{Pn} - (Q_{F0} + Q_{P0}) \quad (2)$$

C'est cette quantité qu'il convient de comparer aux empreintes des solutions concurrentes, évaluées pour les mêmes demandes en énergie ou en produits, et sur les mêmes périodes de temps, pour savoir si des substitutions du bois à des combustibles fossiles ou à d'autres matières ou matériaux permettent, ou non, une atténuation de l'effet de serre.

N.B. Le rôle central attribué à la variation du stock de carbone dans la description des échanges de carbone avec l'atmosphère conduit à retenir la convention de signe naturelle : capture (+), émission (-), convention qui est contraire à celle qui est le plus souvent utilisée dans la littérature. La difficulté est mineure et ne paraît pas nécessiter le recours à un changement artificiel de signe dans l'équation (1) ou dans les expressions qui en découlent. Ainsi une empreinte carbone est positive ou négative selon que, sur la période considérée, la capture l'a globalement emporté sur l'émission ou l'inverse.

L'accent étant ici placé sur le bois énergie, il importe en premier lieu de comparer les propriétés du bois combustible et celles des combustibles fossiles (annexe A). La deuxième étape est de formaliser l'empreinte carbone de la forêt et de l'utilisation de son bois pour décider, à récolte identique, de l'intérêt d'employer le bois comme combustible plutôt que de l'utiliser comme matériau ou matière première pour des produits durables ou, à la limite, de le conserver à l'état brut comme moyen direct d'atténuation du changement climatique (annexe B). La troisième étape est d'incorporer la dynamique forestière dans l'évaluation de l'empreinte carbone d'ensemble, ce qui nécessite un modèle approximatif de la forêt sur lequel on puisse s'appuyer pour chiffrer ses performances en tant que puits de carbone. La forêt métropolitaine française est choisie pour l'illustration, en se fondant sur les données de l'inventaire forestier national pour préciser les valeurs de paramètres (annexe C). La simulation de la dynamique forestière permet enfin le calcul des empreintes carbone pour différents scénarios de récolte qui incluent, notamment, les prévisions de croissance de l'utilisation de la biomasse forestière pour l'énergie selon le Plan d'action national en faveur des

énergies renouvelables (2010) et la Loi de 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte (annexe D) .

V - Le bois n'est pas un bon combustible [Annexe A]

[La bibliographie se rapportant à cette section est détaillée dans l'annexe]

Comme toute matière organique, le bois contient du carbone, 50 % en masse assez précisément (Pettersen 1984). Indiscutablement, sa combustion libère ce carbone dans l'atmosphère sous forme de dioxyde et, accessoirement, de monoxyde et de traces de méthane. Pourtant, dans la plupart des bases de données concernant les gaz à effet de serre, le facteur d'émission du bois (plus généralement celui de la biomasse) est indiqué comme nul au titre de la « neutralité carbone ». La réalité physique est tout autre. [Annexe A, section 1].

Les graphiques des figures 5 et 6 montrent que, par ses caractéristique intrinsèques, le bois, même anhydre, n'est pas un bon combustible ; son pouvoir calorifique inférieur (PCI), qui est typiquement de 18,5 mégajoules par kilogramme (18,5 MJ/kg), est plus faible que celui des principaux combustibles fossiles en usage et son facteur d'émission, c'est-à-dire la masse de CO_2 émise par unité de chaleur dégagée (99,1 gCO_2/MJ), est plus élevé (JRC 2013). Seul le lignite présente des performances de combustible aussi médiocres. Encore faut-il préciser que les valeurs de PCI et de facteur d'émission indiquées pour le bois sont celles de la matière ligneuse anhydre, et que ce PCI décroît linéairement avec le taux d'humidité « sur brut » H % (rapport de la masse d'eau à la masse totale) ; ainsi, pour du bois réputé « sec », séché à l'air, dont le taux H % est couramment de 20 % (bûches par exemple) à 30 % (plaquettes forestières) le pouvoir calorifique type est réduit de ≈ 23 % à 34 % par rapport à celui du bois anhydre et le facteur d'émission est accru de 4 % à 6,5 %. [Annexe A, sections 2 à 5].

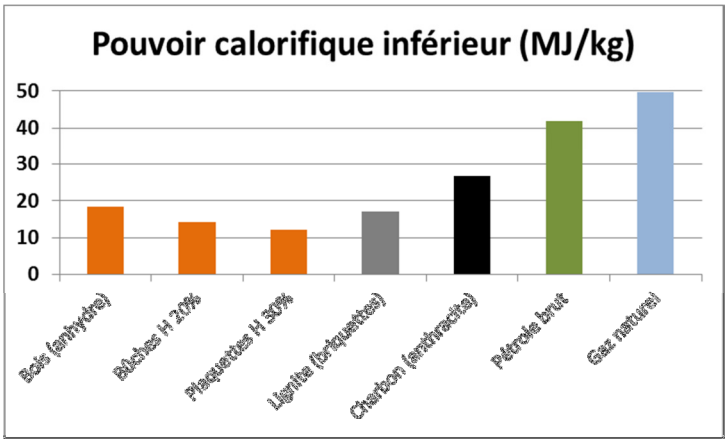


Figure 5 – Pouvoirs calorifiques inférieurs comparés pour les principaux combustibles

Les données sont empruntées à la « Base Carbone » de l'ADEME (2016), sauf pour le bois

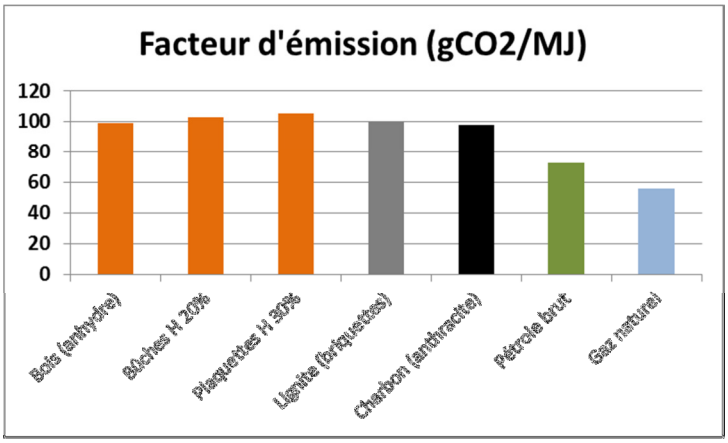


Figure 6 - Facteurs d'émission comparés pour les principaux combustibles

Les données sont empruntées à la Base Carbone de l'ADEME (2016), sauf pour le bois

N.B. Les facteurs d'émission sont souvent donnés en termes de masse de carbone émise par unité de chaleur : la correspondance est de 12 grammes de carbone (C) pour 44 grammes de dioxyde (CO_2) ; l'unité de référence est parfois la tonne-équivalent-pétrole (tep) dont la valeur convenue est 41,87 gigajoules. Le facteur d'émission du bois anhydre (99,1 gCO_2/MJ) s'exprime alors par 1,13 tC/tep ou encore 4,15 tCO_2/tep (annexe A, section 3).

Les valeurs des facteurs d'émission sont quelque peu augmentées lorsqu'on leur intègre les émissions « amont » liées à l'exploitation, au transport, à la transformation, au conditionnement et à la distribution des combustibles, et aussi les émissions d'autres gaz à effet de serre que le dioxyde de carbone dans les conditions réelles de combustion. L'augmentation, variable selon les étapes et traitements possibles entre le gisement du combustible et le point d'utilisation, selon aussi les conditions de combustion, est statistiquement de l'ordre de 10%, plus élevée cependant pour le gaz naturel (≈ 20 %) en raison des pertes directes (fuites) de méthane dans l'atmosphère. Aussi, la prise en compte de ces émissions extrinsèques ne modifie-t-elle pas le classement, sauf exception : c'est le bois qui a bien le facteur d'émission le plus élevé, lignite peut-être excepté. [Annexe A, section 6].

Le bois en tant que combustible rattrape-t-il le désavantage de son facteur d'émission élevé par d'autres qualités ? On n'en trouve guère. Les foyers à bois ont des rendements généralement inférieurs à ceux alimentés par des combustibles fossiles, ce qui réduit la compétitivité économique du bois énergie pour une même quantité de chaleur utile et augmente encore les émissions. Par rapport aux autres combustibles solides, liquides ou gazeux, l'usage du bois soulève des difficultés de manutention, de transport et d'entreposage en raison de son faible PCI, de sa faible densité (≈ 0,5 en moyenne pondérée pour les bois français), et d'un volume apparent par unité de masse qui peut être considérablement accru par rapport au volume réel selon le conditionnement et la fragmentation (par exemple, pour disposer d'une tonne-équivalent-pétrole d'énergie calorifique, 1,25 mètre-cube de fioul suffisent mais il faut environ 14 mètres-cubes de plaquettes forestières). Enfin, la combustion du bois émet de nombreuses substances toxiques ou cancérigènes, ce qui pose de réels problèmes de santé publique : le bois énergie qui ne représente que 4% de la consommation française d'énergie primaire, émet ainsi actuellement plus de particules fines, de composants organiques volatils et d'hydrocarbures aromatiques polycycliques, entre autres polluants, que les secteurs entiers des transports, de l'industrie manufacturière ou de l'agriculture. [Annexe A, section 8].

Certes, il y a un attachement culturel au chauffage au bois, et triste sera le moment où il faudra se priver de flambées festives. Mais on ne peut nier la réalité physique. Cette réalité – un facteur d'émission du bois plus élevé que celui de tout autre combustible, lignite peut-être excepté – est le plus souvent éludée par les partisans du bois énergie sous prétexte de « neutralité carbone ». Il n'empêche qu'en substituant le bois à un combustible fossile, on remplace les émissions de celui-ci par celles de celui-là. Il y aurait avantage, du point de vue climatique, si le facteur d'émission du bois était inférieur à celui du combustible fossile substitué : ce n'est pas le cas. Et on ne peut prétexter de ce que la forêt, en puisant du carbone dans l'atmosphère pour renouveler la matière ligneuse, compenserait l'émission de combustion du bois : si l'objectif est bien d'atténuer le changement climatique, il faut laisser la forêt jouer pleinement son rôle de puits de carbone, en évitant de brûler le bois qu'elle produit, en réservant au contraire ce bois pour des usages durables, et utiliser pour les besoins de chaleur les sources existantes de facteur d'émission plus faible ou, mieux, nul (énergies non carbonées, qu'elles soient renouvelables ou non). Les arguments développés dans les sections suivantes (et dans les annexes B et D) viennent à l'appui de cette thèse.

VI - Comptabilité carbone de l'emploi du bois comme combustible [Annexe B]

[La bibliographie se rapportant à cette section est détaillée dans l'annexe]

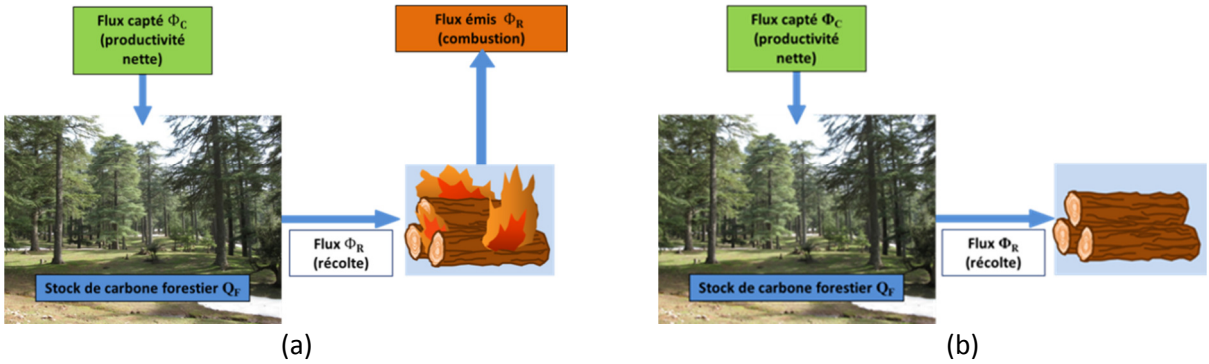
L'évaluation de l'impact d'une activité humaine sur le changement climatique passe par une comptabilisation des émissions de gaz à effet de serre liées à cette activité. Diverses méthodes ont été élaborées pour ce faire («Guidelines » de l'IPCC 2006, « Bilan carbone » avec sa « Base carbone », en France, sous l'égide de l'ADEME 2014, par exemple). Ces méthodes qui, avec des variantes, s'adressent à des pays, des entreprises, des collectivités, des établissements publics..., permettent d'établir des inventaires d'émission globaux, ou par secteur d'activité (énergie, industrie, transports, agriculture, résidentiel...), ou encore par service ou par produit, en vue de satisfaire aux exigences de réduction d'émissions imposées par les traités internationaux ou les législations et réglementations nationales.

En ce qui concerne l'emploi de combustibles fossiles, la règle est simple, au moins en principe : l 'empreinte « carbone » s'obtient en ajoutant à l'émission directe de combustion l'ensemble des émissions annexes, dites « amont », liées aux opérations d'extraction, de transport, de raffinage, de conditionnement et de mise à disposition.

En ce qui concerne l'usage du bois comme combustible, la comptabilisation est, de fait, le plus souvent éludée au nom d'une « neutralité carbone » de cet usage affirmée *a priori*. Il est vrai que pour le bois, à la différence des combustibles fossiles, le « gisement » (la forêt) est actif, captant du carbone dans l'atmosphère pour produire la matière ligneuse. Si donc l'ensemble forestier d'où provient le bois est « géré durablement », euphémisme censé équivaloir à la condition d'équilibre du cycle du carbone illustrée par la figure 3, il n'est pas impossible de rencontrer des situations dans lesquelles, pour des domaines forestiers de quelque étendue, le flux capté (Φ_C , cf. figure 4) et le flux émis par l'emploi des bois récoltés ($\Phi_{É}$) seraient sensiblement égaux. Ce ne pourrait être, cependant, que pour des périodes de temps limitées, car la permanence d'une telle « neutralité » requerrait, comme l'indique l'expression (1), un ajustage précis et synchrone de la productivité nette pour maintenir constant la somme du stock de carbone forestier et de celui contenu dans les produits bois façonnés et les déchets ligneux, quelles que soient les fluctuations de la demande (Φ_R).

À défaut, toute augmentation de récolte de bois pour l'énergie doit être considérée comme surimposant une émission. À l'inverse, une diminution de la récolte équivaut à une capture. Au demeurant, la « neutralité » n'est pas souhaitable alors qu'il s'agit de faire jouer à la forêt un rôle positif dans l'atténuation du changement climatique ($\Phi_C > \Phi_{É}$). [Annexe B, section 1-1].

C'est donc à l'expression générale (2) qu'il convient de se référer pour évaluer l'empreinte carbone de la forêt et de l'utilisation de son bois.



(a) (b)

Figure 7 - Stocks et flux dans une forêt exploitée pour l'énergie (a) ou pour la capture de carbone (b)

Dans le cas d'un ensemble forestier quelconque exploité uniquement pour l'énergie (figure 7 a), l'expression (2) établit l'équivalence, sur une période de temps quelconque, entre l'empreinte carbone intrinsèque du système [forêt + bois énergie] et la variation du stock de carbone forestier Q_F. La figure 8 illustre cette équivalence dans l'exemple d'une parcelle forestière replantée après coupe rase, les produits de la coupe et des éclaircies du nouveau peuplement étant destinés à l'énergie. La variation du stock de carbone forestier (courbe a), lissée pour plus de clarté, est classiquement en forme de segments de sigmoïde décalés en ordonnée, l'amplitude des sauts correspondant à la masse de carbone récoltée au moment de la coupe initiale puis lors des éclaircies successives. L'empreinte carbone est négative (cumul des émissions supérieur à celui des captures) jusque vers 35-40 ans après la coupe initiale, puis devient positive (cumul de captures l'emportant sur celui des émissions). [Annexe B , section 1-2].

Pour cerner l'impact des utilisations de biomasse ligneuse, il convient d'examiner la situation contrefactuelle de non-combustion du bois récolté, c'est-à-dire de conservation pour d'autres usages (figure 7 b). Rien n'est changé en ce qui concerne la forêt dont la productivité nette reste la même que le bois récolté soit brûlé ou non. Par contre, le contenu carbone de la récolte s'accumule hors forêt et ce stock s'ajoute à celui du carbone forestier. Par rapport au cas précédent, l'empreinte carbone intrinsèque est donc augmentée du contenu carbone cumulé des récoltes, ce qu'illustre la courbe (b) de la figure 8. La différence entre les empreintes intrinsèques « bois conservé » et « bois énergie » correspond donc simplement à ce contenu carbone cumulé. Cette conclusion justifie la réflexion de bon sens (lapalissade en vérité) selon laquelle l'utilisation du bois comme combustible s'accompagne de l'émission de son contenu carbone, ce qui infirme le concept de « neutralité

carbone » et d'autres assertions courantes telles que « le facteur d'émission de la biomasse est nul ». [Annexe B , section 1-3].

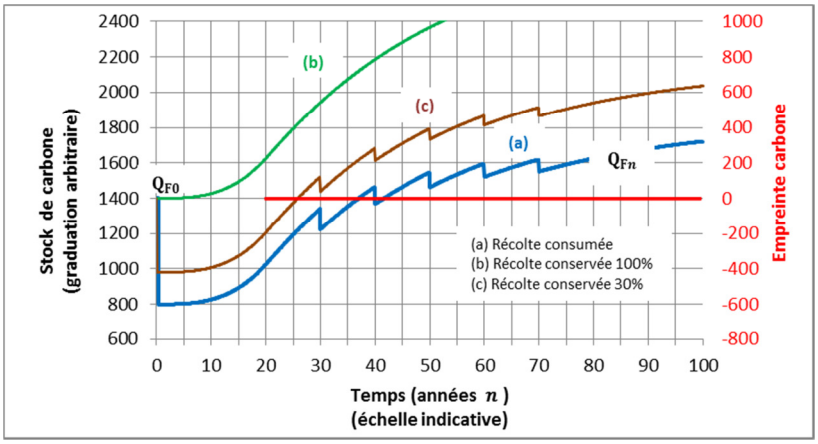


Figure 8 - Équivalence entre empreinte carbone intrinsèque (échelle à droite du graphique) et variation du stock de carbone (échelle de gauche)

[Parcelle forestière replantée après coupe rase ; produits de la coupe et des éclaircies destinés à l'énergie (a), conservés en totalité (b) ou en partie (c) à l'état brut ou transformé]

Les courbes (a) et (b) de la figure 8 délimitent la plage dans laquelle s'inscrit la variation de l'empreinte carbone dans le cas d'une utilisation mixte de la récolte. Dans la schématisation de la figure 9, le facteur γ représente la variation annuelle du stock de carbone Q_P dans les produits bois issus de la récolte opérée dans le domaine forestier considéré, rapportée au contenu carbone de cette récolte ; on suppose ici, pour simplifier, que les déchets ligneux et les produits bois non recyclés en fin de vie sont valorisés comme combustibles. Dans l'exemple illustratif de la figure 8, la courbe (c) représente ainsi à la fois la variation du stock de carbone total, somme du stock de carbone forestier et du contenu carbone des produits bois, et l'évolution de l'empreinte carbone, pour une valeur 0,3 de la proportion γ (augmentation annuelle du stock de carbone hors forêt correspondant à 30 % du contenu carbone de la matière ligneuse récoltée). [Annexe B, section 1-4].

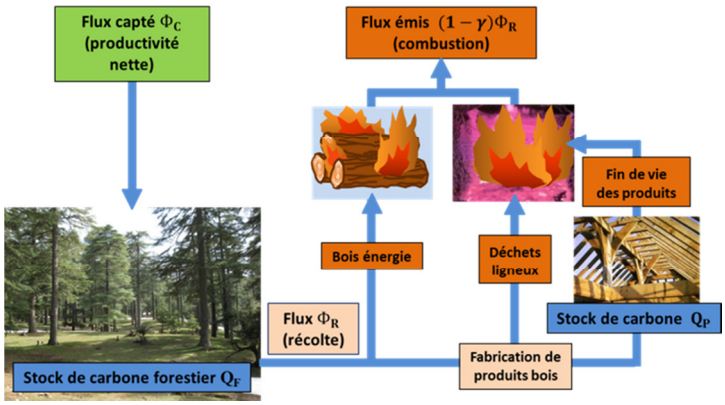


Figure 9 - Stocks et flux dans le cas d'une utilisation mixte de la récolte (bois énergie et produits bois durables)

Le facteur γ représente la variation annuelle du stock Q_P rapportée au contenu carbone de la récolte

Pour une évaluation complète des empreintes, il faut tenir compte des émissions de gaz à effet de serre « amont » qui sont liées à la gestion de la forêt (sylviculture), à l'exploitation forestière, au transport des bois, à leur conditionnement et leur mise à disposition au lieu d'utilisation pour le bois énergie, à leur transformation et à leur commercialisation pour les produits bois d'œuvre et d'industrie. En outre, la combustion du bois dégage en petites quantités quelques gaz à effet de serre autres que le dioxyde de carbone, notamment du méthane, en sorte que l'émission de combustion, en termes d'équivalent carbone, peut se trouver plus élevée que celle qu'on peut déduire du seul contenu carbone du bois consommé. La prise en compte de ces émissions extrinsèques peut se faire approximativement, en les regroupant et en admettant leur proportionnalité aux contenus carbone des bois directement destinés à l'énergie, d'une part, de ceux entrant dans la fabrication de produits, d'autre part. La correction ainsi apportée aux empreintes carbone, par rapport à leur valeur intrinsèque, est de l'ordre de 10 % pour la première part (bois énergie), possiblement plus élevée pour la seconde (produits durables) dans laquelle les émissions « grises » de fabrication ont un poids qui peut être important.

Ces principes de comptabilisation carbone pour la forêt et l'utilisation de son bois ne constituent qu'un canevas mais sont suffisants pour aborder la question de la substitution énergétique du bois à des combustibles fossiles.

La figure 10 schématise les conditions de la comparaison des utilisations pour l'énergie du bois et des matières fossiles : la base de comparaison est une même quantité W de chaleur produite et l'impact « effet de serre » de la combustion est évalué par rapport à la non-combustion.

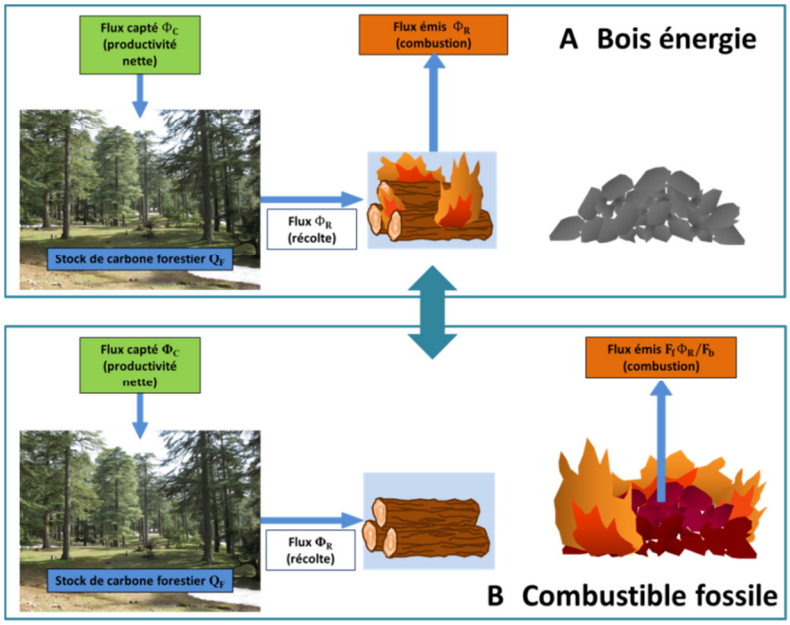


Figure 10 - Schématisation de la substitution de bois énergie à un combustible fossile (A) et de la substitution inverse (B), abstraction étant faite des émissions extrinsèques

Dans le scénario (B), le bois récolté est réservé à des usages durables ou simplement stocké

La référence est une même quantité de chaleur $W = \Phi_R/F_b$; F_b et F_f représentent les facteurs d'émission du bois et du combustible fossile respectivement

Que le bois récolté soit ou non utilisé pour l'énergie, la forêt capte le même flux de carbone. Dans ces conditions, la différence B des empreintes carbone intrinsèques des scénarios A et B, c'est-à-dire le bilan de substitution du bois à un combustible fossile, se réduit, pour une même quantité de chaleur libérée, à la différence entre le facteur d'émission F_f du combustible fossile et celui F_b du bois, ce qui ne peut étonner. Comme le bois a un facteur d'émission supérieur à celui de n'importe quel combustible fossile ($F_b > F_f$, lignite peut-être excepté), le bilan de substitution se trouve négatif (ce qui signifie une augmentation d'émission selon la convention de signe adoptée) et l'utilisation du bois pour l'énergie apparaît intrinsèquement comme défavorable pour un objectif de limitation des émissions de gaz à effet de serre. Le tableau 1 indique, pour l'unité d'énergie rendue, quelques valeurs du bilan intrinsèque de la substitution de biomasse ligneuse (anhydre) à des combustibles fossiles caractérisés par leur facteur d'émission type.

Combustible	Facteur d'émission (tC/tep)	Bilan de substitution intrinsèque (tC/tep)
Bois (anhydre)	1,133	0
Charbon aggloméré	1,088	– 0,045
Pétrole brut	0,833	– 0,3
Gaz naturel	0,638	– 0,495

Tableau 1 – Bilans « carbone » intrinsèques de la substitution de bois à divers combustibles fossiles

Le signe (-) affectant les valeurs de bilan souligne que la substitution s'accompagne d'une augmentation d'émission

[Une tonne-équivalent-pétrole (tep) équivaut à 41,87 gigajoules]

La prise en compte des gaz à effet de serre émis « en amont » pour l'exploitation, le transport, la transformation, le conditionnement et la distribution des combustibles, ainsi que des émissions d'autres gaz à effet de serre que le dioxyde de carbone dans les conditions réelles de combustion, n'accroît que de manière marginale les valeurs effectives des facteurs d'émission (moins de 10%, sauf exception, jusqu'à 20% pour le gaz naturel) et ne peut donc changer les conclusions qu'on peut tirer de la comparaison des chiffres portés dans le tableau 1. [Annexe B, section 2-2].

Mieux vaudrait donc, à l'inverse, utiliser des combustibles fossiles à la place du bois pour les besoins de chaleur. Minime avec le charbon, le bénéfice « effet de serre » serait net avec le pétrole et important avec le gaz naturel en substitution du bois énergie (cf. tableau 1) ; ce bénéfice serait égal au contenu carbone du bois imbrûlé avec des sources substitutives non-carbonées, ce qui est évidemment le bon choix. Bien entendu, une condition essentielle, à volume de récolte imposé, est de conserver le bois à l'état brut ou transformé. [Annexe B , section 2-1].

La conclusion est que, sous réserve de la possibilité de conserver le bois récolté, sous forme brute **ou** travaillée, la substitution de bois énergie à un combustible fossile entraîne un accroissement des émissions de carbone, quel que soit le combustible substitué et quelle que soit la gestion de la forêt productrice. Cette conclusion est contraire à toutes les affirmations qui, jusqu'à présent, ont motivé la promotion du bois énergie (et, plus généralement, des bioénergies). La « neutralité carbone » a été, jusqu'à une date récente, le principal argument des partisans de la substitution du bois aux combustibles fossiles dans un contexte de changement climatique ; rappelons seulement que la « neutralité carbone » non seulement suppose que la biomasse consumée ou perdue lors de la récolte est renouvelée de manière synchrone et en égale quantité dans l'écosystème où elle est prélevée, mais encore fait fi de ce que cette biomasse pourrait être utilisée autrement que comme

combustible ou même ne pas être utilisée du tout. Retiennent par contre l'attention, des travaux récents d'auteurs qui, à la suite de la publication du « Manomet Report » (Walker et coll. 2010), en sont venus à des conceptions plus proches de la réalité, en intégrant dans le « système étudié », comme cela est fait dans le présent document, la forêt, le bois qu'on en extrait, le combustible fossile substitué, et tiennent compte de la valeur élevée du facteur d'émission de la biomasse ligneuse. La différence principale par rapport à la conception de substitution illustrée par la figure 10 est que le scénario de référence (la situation contrefactuelle) est l'abandon de la forêt à son évolution naturelle. Il y a donc un progrès par rapport à la « neutralité carbone » en ce que les propriétés des combustibles sont prises en compte ; par contre, la conclusion, qui reste favorable au bois énergie, peut être tenue pour artificielle en raison de la médiocrité du scénario de référence choisi (non-récolte). [Annexe B, section 3]

VII - Puits de carbone de la forêt française métropolitaine [Annexe C]

[La bibliographie se rapportant à cette section est détaillée dans l'annexe]

Dans l'empreinte carbone, telle qu'elle est définie dans les sections IV et VI, la forêt intervient par le flux de carbone capté net (Φ_C). Celui-ci reste à expliciter, ce qui nécessite un inventaire des stocks de carbone dans les différents compartiments forestiers et l'appréciation de leur variation. Le cas de l'ensemble de la forêt française métropolitaine, documenté par l'Inventaire forestier national, est pris pour exemple, la méthode utilisée, codifiée par des instances internationales (IPCC, FAO...), étant de fait applicable à n'importe quel ensemble forestier.

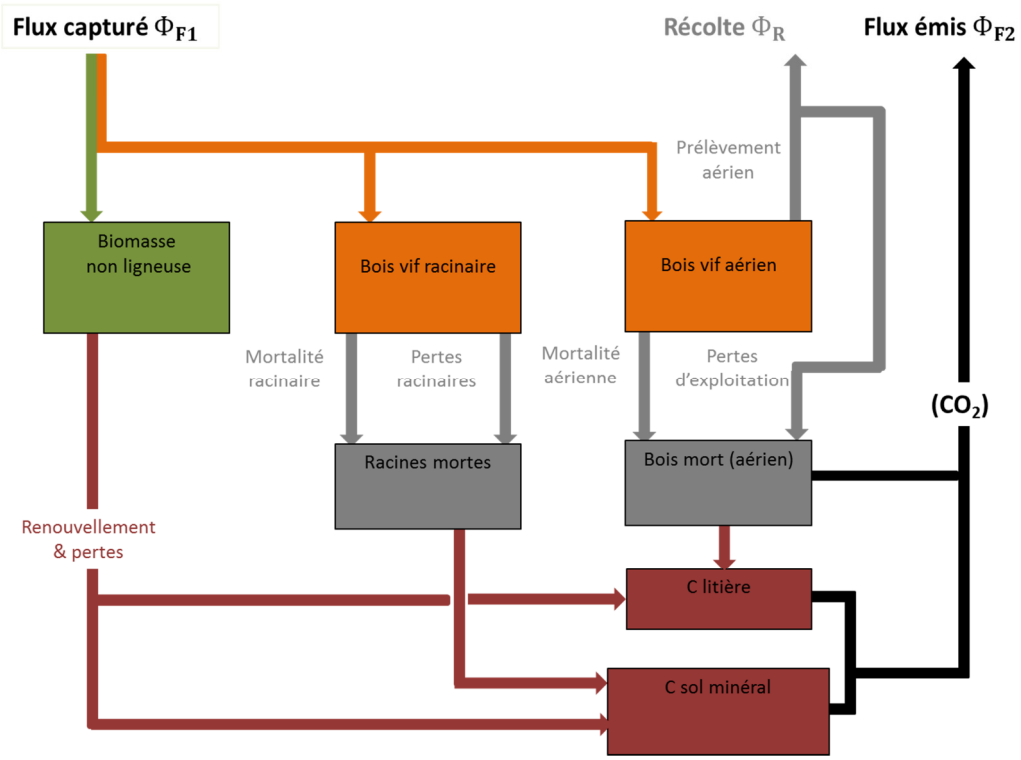


Figure 11 – Schéma simplifié des compartiments forestiers et des flux de carbone qui y transitent

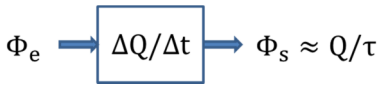
Colorations brun-orangé pour le bois vif, verte pour la biomasse non ligneuse, grise pour le bois mort, marron pour la matière organique de la litière et du sol. La différence $\Phi_{F1} - \Phi_{F2}$ correspond à la productivité nette Φ_C.

En focalisant tout d'abord l'analyse sur la seule forêt, le puits de carbone, c'est-à-dire la balance des flux entrant et sortant, correspond à la variation annuelle du stock de carbone forestier Q_F. Ce stock est réparti dans des « compartiments » dont les principaux sont les troncs, branches et les racines ligneuses des arbres vivants, le feuillage et la végétation du sous-bois, les racines fines et les mycéliums associés, le bois mort sur pied ou au sol, les racines mortes, la litière et le sol minéral. La répartition est représentée schématiquement sur la figure 11 où, pour simplifier, on a regroupé dans de mêmes compartiments les troncs et branches (bois vif aérien), d'une part, le feuillage, la végétation du sous-bois, les racines fines et les mycéliums (biomasse non ligneuse), d'autre part. Les flux de carbone indiqués sont définis sur une base annuelle. Le flux de carbone (ou de CO_2) Φ_{F1} capturé dans l'atmosphère alimente la production nette de matière organique ; ce flux résulte de ceux de sens opposés associés aux processus de photosynthèse et de respiration de la végétation et correspond à la productivité primaire nette (PPN). Le flux Φ_{F2} (émis) est celui que renvoie dans l'atmosphère la décomposition de la matière organique morte ou l'incendie. Le flux Φ_C, productivité nette de l'écosystème (PNE) est la différence $\Phi_{F1} - \Phi_{F2}$. Le puits de carbone forestier (compté positivement lorsqu'il correspond à une capture nette de carbone dans l'atmosphère) est quantifié annuellement par la différence $(\Phi_C - \Phi_R)$ où Φ_R est le flux de carbone emporté par la récolte. Les flux échangés entre compartiments ont pour raisons principales : 1) la mortalité naturelle des arbres (transfert de carbone des compartiments de bois vif aux compartiments de bois mort), 2) le renouvellement de la biomasse non ligneuse (transfert de carbone à la litière, par le feuillage principalement, et au sol minéral, par les racines fines et les mycéliums), 3) la récolte (pertes d'exploitation aériennes et racinaires qui rejoignent les compartiments de bois mort ; pertes de biomasse non ligneuse qui contribuent à l'enrichissement de la litière et du sol en matière organique), 4) la décomposition de la nécromasse qui, via la litière et le sol, ou directement à partir des compartiments de bois mort, est la source du flux Φ_{F2}.

À l'échelle d'un peuplement, d'un massif ou du domaine forestier d'un pays tout entier, l'évaluation en ordre de grandeur du stock de carbone Q_F et de sa répartition dans les différents compartiments peut être faite à partir de données d'inventaire portant notamment sur le « volume bois fort tige » des arbres, en consentant des approximations sur les rapports à ce volume des contenus carbone des autres compartiments ligneux. 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. Ce sont des études sur des échantillons représentatifs des arbres en place qui permettent de déterminer les « facteurs d'expansion » reliant le volume aérien, branches incluses, au volume de bois fort, puis le volume total, racines incluses, au volume aérien. De manière également statistique, on détermine la densité moyenne de la matière ligneuse, plus précisément son « infra-densité », c'est-à-dire le rapport de la masse anhydre au volume « humide » du bois vert. On peut ainsi passer du volume ligneux sur pied à sa biomasse. Le contenu carbone est sensiblement 50% de cette biomasse. Il convient d'ajouter les contenus carbone des compartiments autres que ceux de bois vif : bois mort sur pied, chablis et bois mort au sol, ceux-ci faisant également l'objet d'inventaires, racines mortes, litière et sol minéral, ceux-là étant moins immédiatement accessibles et, de ce fait, actuellement mal renseignés, biomasse non ligneuse (feuillage, racines fines et mycéliums associés, végétation herbacée...) sur laquelle on ne dispose que de peu d'information. La sommation des

résultats obtenus pour chacun des compartiments identifiés conduit au stock de carbone Q_F du peuplement, du massif, ou du domaine forestier considéré. L'évaluation des flux de carbone, relatifs à la production annuelle ligneuse brute, à la mortalité et aux prélèvements de bois, et échangés entre les différents compartiments, procède de la comparaison de données d'inventaires réalisés consécutivement à intervalles de temps de quelques années. [Annexe C, sections 1 et 2-1].

Pour chaque compartiment, l'accroissement ou la diminution ΔQ du stock de carbone par unité de temps Δt (l'année en matière forestière) résulte de la différence entre la somme des flux entrants $\Phi_{\mathbf{e}}$ et celle des flux sortants $\Phi_{\mathbf{s}}$; il s'agit là de la simple application du principe de conservation. De plus, dans une approximation linéaire au premier ordre, le flux sortant $\Phi_{\mathbf{s}}$ peut être exprimé comme le rapport du stock Q au temps de transit τ du carbone dans le compartiment considéré (figure 12 a). Si on envisage l'évolution du système sur une période de plusieurs années, il est plus commode, pour faciliter les développements mathématiques, de considérer stock et flux comme des fonctions continues du temps t, c'est-à-dire assimiler Δt à l'élément différentiel dt et le rapport $\Delta Q/\Delta t$ à la dérivée dQ/dt (figure 12 b). [Annexe C , section 2-3-2]



$$\Phi_{\mathbf{e}} = \Delta Q/\Delta t + \Phi_{\mathbf{s}} \approx \Delta Q/\Delta t + Q/\tau$$

(a)

$$\Phi_{\mathbf{e}} = dQ/dt + \Phi_{\mathbf{s}} \approx dQ/dt + Q/\tau$$

(b)

Figure 12 - Représentation approchée linéaire au premier ordre de la dynamique d'un système obéissant à une loi de conservation.

On dispose ainsi d'un modèle approximatif (linéaire, premier ordre, paramètres constants) permettant d'interpréter les résultats d'inventaire en termes de paramètres et de conditions initiales et de réaliser des projections à plus ou moins long terme de l'évolution du puits forestier en différentes circonstances (cf. section suivante et annexe D).

Une estimation sommaire des stocks et flux de carbone pour l'ensemble des forêts de production française est reportée sur la figure 13 ; l'année de référence 2010 est choisie en raison de la disponibilité d'un ensemble de données raisonnablement convergentes, dont celles collectées dans le cadre du programme permanent d'inventaire des ressources forestières (Inventaire forestier national IFN) piloté par l'Institut géographique national IGN (cf. Annexe C, section 2).

La précision apparente des valeurs de stocks et flux indiquées ne doit pas faire illusion et ne résulte que du souci de préserver la cohérence arithmétique, notamment en ce qui concerne les rapports entre flux et variations de stock pour chaque compartiment, ou pour l'ensemble. En ce qui concerne les compartiments de bois vif, des marges d'incertitude importantes pouvant aller jusqu'à ± 25 % affectent non pas tant les données d'inventaire de l'IGN que les facteurs de conversion permettant d'accéder, à partir des volumes « bois fort tige » aux volumes réels, aux biomasses correspondantes et aux contenus carbone. Faute de données sûres, les valeurs de stocks de carbone dans les compartiments autres que ceux de bois vif, et celles des flux associés, sont encore hypothétiques ; mises entre parenthèses, elles sont acceptables dans leur ordre de grandeur.

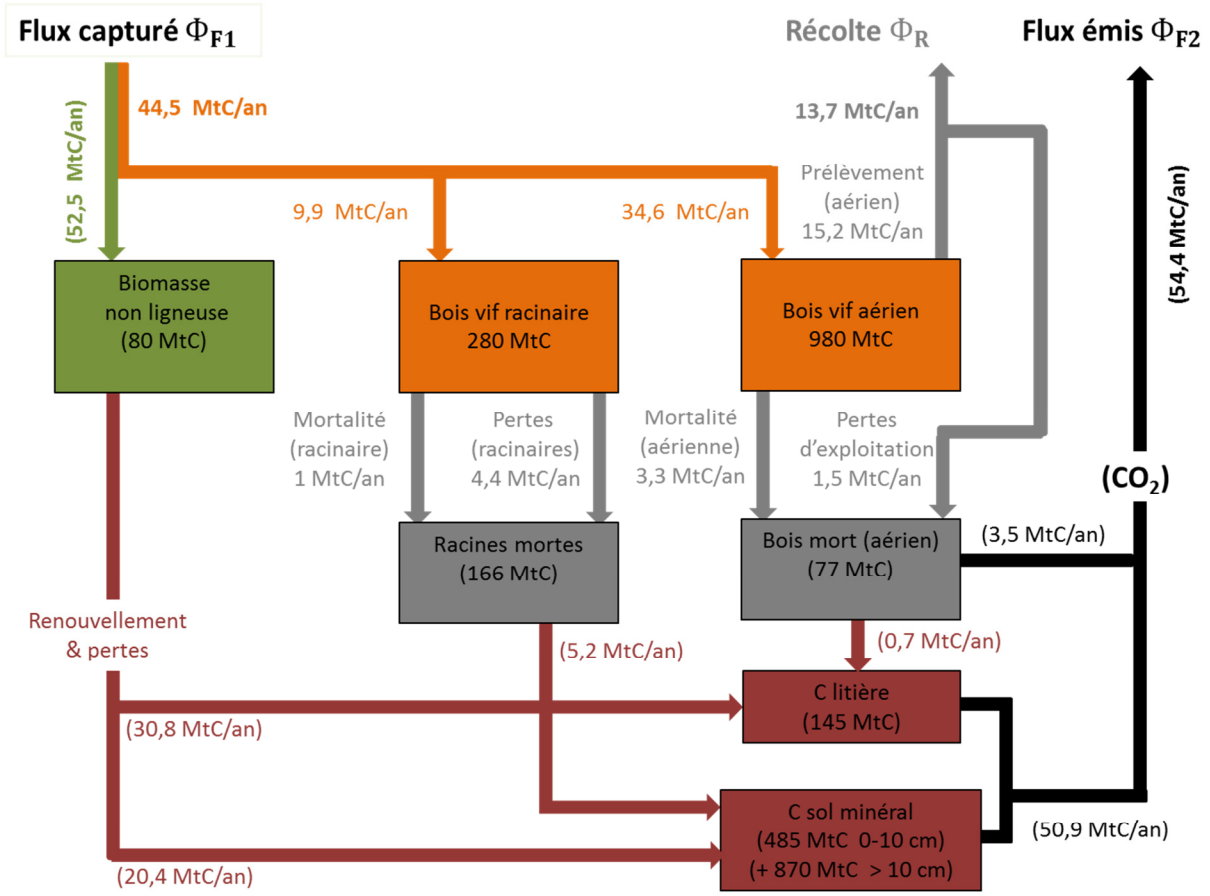


Figure 13 - Stocks et flux de carbone dans la forêt française métropolitaine
(Valeurs rapportables à l'année 2010 ; celles mises entre parenthèses sont hypothétiques)

La surface forestière de production en France métropolitaine est d'environ 16 millions d'hectares et la masse de carbone contenue dans la biomasse ligneuse des arbres recensables est évaluée à 1,26 gigatonnes (GtC) soit, en moyenne, 79 tonnes par hectare (tC/ha). Cette masse se répartit en 980 millions de tonnes pour les troncs et branches (720 pour les arbres feuillus, 260 pour les résineux) et 280 millions de tonnes pour les racines (201 pour les feuillus, 99 pour les résineux). La part « ligneuse » de la production primaire nette annuelle Φ_{F1} est de 44,5 millions de tonnes de carbone par an (MtC/an) dont 34,6 MtC/an sont allouées à la partie aérienne des arbres et 9,9 MtC/an à la partie racinaire. Le flux lié à la mortalité naturelle des arbres est de 4,3 MtC/an dont 3,3 MtC/an qui alimentent le compartiment « bois mort » et 1 MtC/an qui rejoignent celui des « racines mortes ». Le contenu carbone de la récolte annuelle est estimé à 13,7 MtC/an mais le « prélèvement » sur le stock de carbone du bois vif est plus important en raison des pertes d'exploitation, environ 1,5 MtC/an pour le bois abandonné au sol, et 4,4 MtC/an pour les racines des arbres abattus qui restent généralement en place ; le prélèvement en masse de carbone est donc au total de 19,6 MtC/an. La part « ligneuse » de la production Φ_{F1} (44,5 MtC/an) diminuée des flux de mortalité et de prélèvement représente l'accroissement annuel en masse de carbone ligneux, soit 20,6 MtC/an ; ce chiffre est celui de la contribution du bois vif au puits de carbone forestier. [Annexe C, sections 2-2 et 2-3-1].

Les données concernant les stocks de carbone et flux associés pour les compartiments autres que ceux de bois vif sont, pour le moment, quasi inexistantes (racines mortes, biomasse non ligneuse) ou très imprécises (bois mort, litière et sol). On dispose cependant de quelques éléments d'information et ceux-ci peuvent être coordonnés pour indiquer des ordres de grandeur (cf. Annexe C, sections 2-2 et 2-3-2).

La biomasse non ligneuse (feuillage, végétation herbacée, racines fines et mycéliums des champignons symbiotiques) ne représente qu'une faible part du stock de carbone forestier (de l'ordre de 80 MtC) mais le flux qui lui est associé (de l'ordre de 50 MtC/an) est considérable en raison de la brièveté de la vie de ses constituants. Les valeurs indiquées pour les flux dirigées vers la litière (30,8 MtC/an) et vers le sol minéral (20,4 MtC/an) tiennent compte des pertes liées à l'exploitation. Si l'on admet la proportionnalité de la biomasse non ligneuse à la biomasse ligneuse, l'accroissement de la première serait d'environ 1,3 MtC/an, ce qui permet d'estimer à 52,5 MtC/an la part « non ligneuse » de la production primaire nette. Le flux total capturé Φ_{F1} s'élèverait donc à 97 MtC/an. [Annexe C, sections 2-2 et 2-3-2 c].

Pour les autres compartiments, en s'appuyant sur des inventaires lorsqu'ils existent (cas du bois mort sur pied ou au sol et chablis), sur des ordres de grandeur rapportés dans la littérature pour des essences, sols et climat comparables (racines mortes), sur quelques relevés de terrain (litière et sol), et par identification avec le modèle de compartiment de la figure 12 sous hypothèse de « régime forcé » (cf. appendice E), on parvient aux valeurs affichées entre parenthèses sur la figure 13. Celles-ci restent à confirmer mais sont acceptables dans leur ordre de grandeur.

Les valeurs retenues pour les stocks de carbone dans les compartiments « bois mort » et « racines mortes » sont 77 et 166 MtC pour des temps de résidence τ de 18,1 et 32,5 ans respectivement, avec des marges d'incertitude importantes (± 20-25 %). Le flux de carbone issu de la décomposition du bois mort, évalué par le rapport du stock au temps de résidence, serait de 4,2 MtC/an dont la plus grande part (≈ 5/6 ?) correspond à une émission directe de CO_2 dans l'atmosphère, la part restante étant incorporée à la matière organique de la litière. Le flux issu de la décomposition des racines mortes, évalué de la même manière par le rapport du stock au temps de transit, s'élèverait à 5,1 MtC/an, alimentant préférentiellement le compartiment « sol minéral » en carbone. Le stockage dans ces compartiments, obtenu par différence entre les flux entrants, serait donc de 0,6 MtC/an dans le bois mort, 0,2 MtC/an dans les racines mortes, soit 0,8 MtC/an au total. Cette contribution au puits de carbone forestier est faible comparativement à celle du bois vif, ce qui atténue les conséquences de l'incertitude qui l'entoure pour l'estimation du puits global. [Annexe C, sections 2-2 et 2-3-2 a et b].

Selon des observations convergentes, dont celles effectuées sur la centaine de sites du réseau « Rénécofor » (Réseau national de suivi à long terme des écosystèmes forestiers), la litière et le sol minéral contiendraient en moyenne 95 tC/ha, environ 1,5 GtC au total, soit autant que la biomasse ligneuse, avec une répartition approximative de 145 MtC pour la litière, 485 MtC pour les couches superficielles du sol minéral (0 - 10cm) et 870 MtC pour le sol profond. Par référence au modèle de compartiment de la figure 12, les données de terrain permettent d'avancer des temps de résidence τ de 4,9 ans pour la litière et de 22,7 ans pour les premières couches 0-10 cm du sol minéral ; le temps de résidence reste indéterminé pour les couches profondes du sol, celles-ci participant peu, comparativement, au stockage de carbone. En conséquence, les accumulations de carbone dans la

litière et le sol seraient de 2 MtC/an et 4,1 MtC/an respectivement, soit 6,2 MtC/an au total, et le flux de carbone rendu à l'atmosphère, sous forme de dioxyde essentiellement, peut être évalué à 50,9 MtC/an ; ce flux s'ajoute à celui issu directement du compartiment « bois mort » et le flux Φ_{F2} (respiration hétérotrophe) s'élèverait donc à 54,4 MtC/an. [Annexe C, sections 2-2 et 2-3-2 d].

La productivité nette $\Phi_C = \Phi_{F1} - \Phi_{F2}$ est, selon ces chiffres, de 42,6 MtC/an et le puits de carbone forestier $\Phi_C - \Phi_R$ s'élève à 28,9 MtC/an. Le puits total incluant l'utilisation de la récolte s'obtient en ajoutant algébriquement au puits de carbone forestier la variation annuelle du stock de carbone contenu dans les produits bois en usage ou placés en décharge. Cette variation est mal connue, assurément de faible importance ; une estimation un peu ancienne (2005) est 0,9 MtC/an qu'on conserve pour les années récentes, faute de mieux. Le « puits » total représenté par la forêt française et l'utilisation des bois serait donc, pour l'année de référence 2010, de 29,8 millions de tonnes de carbone par an (109 $MtCO_2$/an), peu différent du puits de carbone strictement forestier. Ce puits compense près de 25% du total des émissions de CO_2 en France métropolitaine (452 $MtCO_2$ en 2010). Ce résultat n'est pas significativement différent de celui obtenu par d'autres auteurs, compte tenu de l'étendue des marges d'incertitude. [Annexe C, sections 2-4 et 3].

Aux échanges directs de carbone entre la forêt et les filières d'utilisation de son bois, d'une part, l'atmosphère, d'autre part, il est souvent convenu d'adjoindre les effets indirects – réductions d'émission – qu'entraînent les substitutions possibles de bois à d'autres matériaux ou d'autres combustibles. La pratique est d'estimer les réductions d'émission que permettraient ces substitutions à l'aide de coefficients rapportant au mètre cube de bois la masse de CO_2 « évitée » et d'ajouter ces réductions à la valeur de puits précédemment calculée. Des coefficients de 1,1 à 1,6 tonne de CO_2 par mètre-cube de produit bois fini, de 0,4 à 0,5 tCO_2/m^3 pour l'utilisation du bois comme combustible, basés sur l'assertion de « neutralité carbone », sont ainsi actuellement avancés pour une réévaluation du puits de carbone total de 30 à 40 $MtCO_2$/an. Cette réévaluation tend à faire croire à un avantage systématique des substitutions pour lutter contre l'augmentation de l'effet de serre. Or, comme cela est montré dans la section VI précédente (et dans l'annexe B), l'effet de la substitution « énergétique » se mesure, physiquement, par la différence entre le facteur d'émission du combustible substitué et celui du bois ; les valeurs de facteurs d'émission indiquées dans le tableau 1 montrent que cet effet est négatif (augmentation des émissions) quel que soit le « mix » énergétique considéré. Quant à la substitution « matériau », la fourchette proposée de 1,1 à 1,6 tonne de CO_2 par mètre-cube de produit fini repose, pour l'évaluation des émissions « grises », sur une distinction qui n'a pas lieu d'être entre carbone « fossile » et carbone « biogénique » : les émissions de combustion de carbone « biogénique » ne sont pas comptabilisées, toujours en vertu de la « neutralité carbone de la biomasse », alors que ce sont les principales dans l'industrie du bois en raison de l'importance de la ressource en coproduits ligneux valorisables comme combustible (écorces, sciures, dosses, déchets de façonnage...). Par ailleurs, le principe même d'une réévaluation globale du puits de carbone est contestable car les effets des substitutions ne devraient être comptabilisés que si ces substitutions sont effectivement réalisées ou, à tout le moins, réalisables. Dans ce qui suit, ne sera donc plus considéré que le puits de carbone forestier, augmenté du stockage de carbone, hors forêt, dans la matière ligneuse récoltée, sans prise en compte d'effets de substitution [Annexe C, section 4].

VIII - Scénarios d'évolution [Annexe D]

[La bibliographie se rapportant à cette section est détaillée dans l'annexe]

Le schéma de la figure 11 et la représentation de la figure 12 applicable à chacun des compartiments proposent un modèle de la dynamique forestière dans le cadre simple d'une approximation linéaire du premier ordre à coefficients constants. Il est alors possible, une fois acquis les paramètres caractéristiques τ de chacun des compartiments et pour des conditions initiales indiquées par les inventaires forestiers, de dérouler des scénarios d'évolution de la forêt selon des prévisions de récolte $\Phi_R(t)$ et/ou de productivité $\Phi_C(t)$. Pour chaque scénario, on évalue ainsi, au moins en ordre de grandeur, la variation du stock de carbone forestier $Q_F(t)$ et celle du contenu carbone des produits $Q_P(t)$ selon les options d'utilisation des bois récoltés. L'empreinte carbone de la forêt et de l'utilisation de son bois correspond, sur une période de temps donnée, à la variation, sur cette période, du stock total $Q_F + Q_P$ (annexe B, section 1-2).

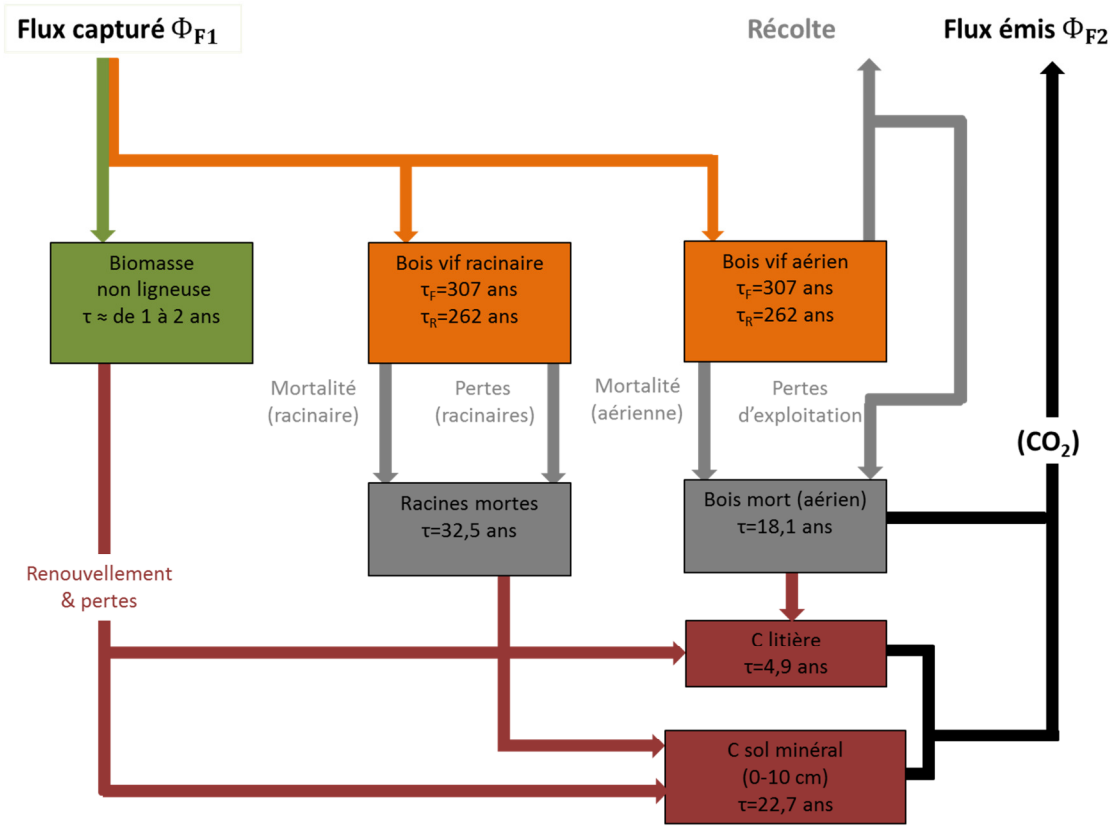


Figure 14 - Schéma simplifié des compartiments forestiers et des flux de carbone qui y transitent.
Les valeurs indiquées pour les temps caractéristiques τ sont utilisées, dans cette section, aux fins d'illustration numérique.
Ces valeurs ne prétendent pas à l'exactitude ; elles ne sont que plausibles (cf. section 2-3 de l'annexe C).
Les indices $_F$ et $_R$ font référence aux bois feuillus et résineux respectivement.

Dans la continuité de la section précédente, le cas de la forêt métropolitaine française est pris pour support d'illustration. Par commodité, le schéma de la figure 11 est reproduit figure 14 avec indication, pour chaque compartiment, de la constante de temps τ qui le caractérise (temps de résidence, de transit ou de renouvellement du carbone dans le compartiment). La valeur de ce temps est obtenue, d'après les données d'inventaire, en faisant le rapport du stock de carbone au flux

sortant (cf. figure 13). Une distinction est faite entre bois feuillus (indice F) et bois résineux (indice R) dont les paramètres caractéristiques τ_F et τ_R, les facteurs d'expansion et les infra-densités (cf. tableau 1 de l'annexe C) sont statistiquement assez différents. Quelques autres détails de moindre importance, en ce qui concerne la ventilation des flux sortants lorsque ceux-ci alimentent plusieurs compartiments, notamment, sont précisés dans la section 1 de l'annexe D. Le flux reçu par chacun des compartiments provient de celui qui le précède et le flux sortant alimente le compartiment qui le suit en une cascade unidirectionnelle, en sorte que le calcul de l'évolution du stock de carbone Q dans chaque compartiment à partir d'une condition initiale donnée est totalement explicite en résolvant l'une des équations indiquées sur la figure 12 selon qu'on adopte un formalisme discret (a) ou continu (b). Lorsqu'un compartiment est alimenté par plusieurs flux, la linéarité du système permet d'obtenir la solution par superposition des évolutions déterminées pour chacun des flux agissant isolément. Dans ces conditions, déterminer l'évolution du « système forestier » sous différentes contraintes, notamment de récolte, ne présente pas de difficulté, mais peut être fastidieux : un programme de calcul simple (fichier tableur) a été utilisé pour le déroulement des scénarios décrits ci-après. [Annexe D, section 1].

a) Empreinte carbone d'un supplément ponctuel de récolte [Annexe D, section 2]

Pour des raisons théoriques, afin de mettre en évidence des aspects souvent ignorés de la dynamique forestière, il est intéressant d'analyser la réaction de la forêt à une sollicitation-test impulsionnelle. On considère, pour ne pas trop s'écarter des réalités, l'effet d'une récolte supplémentaire ponctuelle de 1 million de mètres-cubes, opérée l'année « 0 » choisie pour origine des temps, par rapport à un scénario d'évolution de la forêt française qui peut, a priori, être quelconque et qu'il n'est donc pas nécessaire de préciser. Dans un cadre d'approximation linéaire invariant en effet, les variations $\Delta Q(t)$ subies par les stocks du fait de ce supplément de récolte obéissent aux mêmes équations que les stocks $Q(t)$ eux-mêmes, avec des conditions initiales nulles par raison de continuité. On fait choix, pour simplifier, de ne faire porter l'augmentation de récolte que sur les peuplements feuillus et on admet, encore pour simplifier, que la production biologique brute n'est pas affectée ou, tout au moins, rapidement rendue conforme au scénario de référence par des interventions sylvicoles directes.

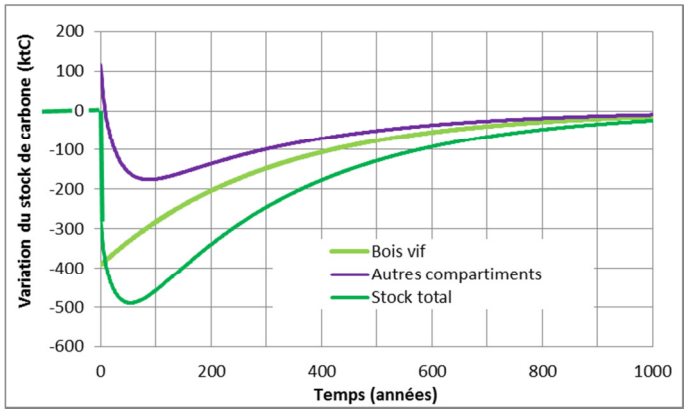


Figure 15 - Variations des stocks de carbone consécutives à un supplément ponctuel de récolte de 10^6 m^3 de bois feuillus.

Le prélèvement est supposé sans impact sur la production biologique brute.

La variation du stock total représente aussi celle de l'empreinte carbone du supplément de récolte (cf. figure 8).

La figure 15 représente, consécutivement au supplément ponctuel de récolte, les variations de stocks de carbone dans le bois vif (courbe vert pâle) et dans les autres compartiments (courbe violette) ainsi que la variation du stock total (courbe vert foncé) par rapport à ce que seraient les évolutions de ces stocks si cette récolte supplémentaire n'avait pas lieu. La variation du stock total représente aussi celle de l'empreinte carbone du supplément de récolte (cf. figure 8).

La plage de temps considérée peut surprendre (1000 ans). Elle est imposée par la constante de temps principale τ_F = 307 ans pour les bois feuillus (le temps de réponse à 95% d'un système linéaire du premier ordre est approximativement trois fois la constante de temps). De fait, les résultats de la figure 15 ont valeur théorique ; ce sont ceux d'un scénario, non d'une prévision et ils ne représenteraient la réalité, a posteriori, que si les temps de résidence du carbone dans les différents compartiments demeuraient constants, ce qui est invraisemblable sur un tel intervalle de temps.

Les évolutions de stock de carbone peuvent être interprétées et commentées, à grands traits, de la manière suivante :

- Une récolte de 10^6 m^3 réels de bois feuillus correspond à un contenu carbone de 275 ktC et il n'est pas étonnant qu'au moment de cette récolte, le stock de carbone forestier soit réduit de cette quantité. Cependant le prélèvement effectué sur le bois vif correspond à une masse de carbone plus importante, 391ktC, la différence 116 ktC représentant la somme du contenu carbone des pertes d'exploitation, estimées à 10% du prélèvement aérien, et de celui des racines des arbres exploités, laissées en place. Aussi, les ordonnées à l'origine, pour les courbes représentant les variations de stock de carbone dans le bois vif, dans les autres compartiments et dans l'ensemble, sont-elles respectivement -391 ktC, +116 ktC et -275 ktC.

- En ce qui concerne le bois vif, la réduction de stock consécutive au supplément ponctuel de récolte entraîne celle de la mortalité annuelle en sorte que, à production biologique inchangée, la production nette augmente ; ceci implique une variation positive de l'accroissement, en volume sur pied et en stock de carbone, et, par conséquent, un retour progressif au scénario de référence. La loi de conservation impose toujours en effet :

  Accroissement = Production biologique brute – Mortalité – Prélèvement (3)

  La réduction du stock de carbone tend donc asymptotiquement vers zéro selon une dynamique approximative du premier ordre, soit exponentielle avec $\tau_F = 307$ ans pour constante de temps (figure 15, courbe vert pâle).

- En ce qui concerne les autres compartiments, le stock de carbone d'abord excédentaire par rapport à celui du scénario de référence, devient vite déficitaire. La décroissance, rapide à l'échelle des temps considérée sur la figure 15, résulte, d'une part, de la décomposition de la matière organique initialement déposée par les pertes d'exploitation, d'autre part, d'un déstockage de carbone dans les compartiments « bois mort », « racines mortes », « litière » et « sol », consécutif à la réduction des apports de carbone à ces compartiments en relation avec celle des stocks de carbone dans le bois vif et la biomasse non ligneuse (diminutions de la mortalité ligneuse et du renouvellement non ligneux). La décomposition et le déstockage sont étalés dans le temps, suivant une chronologie fixée par les constantes de temps des compartiments impliqués. La réduction maximale du stock, comptée à partir de l'origine des

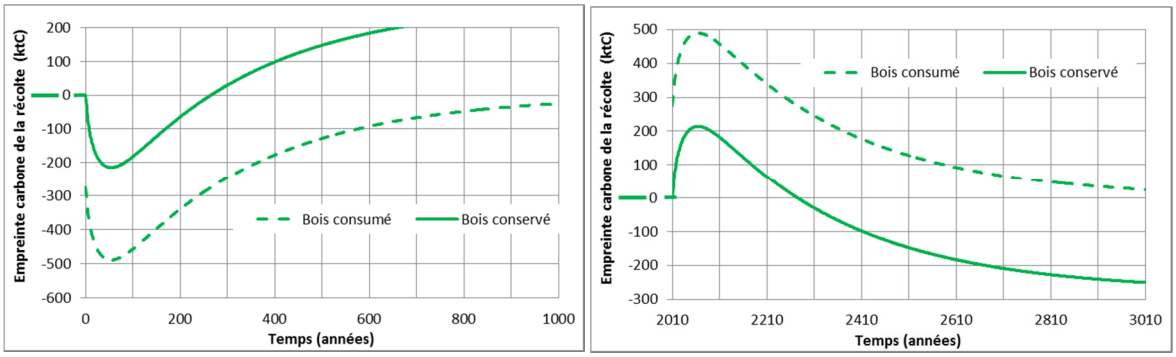
temps est de 292 ktC pour t ≈ 87 ans, ce qui va bien au-delà de ce qu'on peut estimer sur la base de la seule décomposition des pertes d'exploitation (116 ktC). L'ordonnée du minimum de la courbe violette de la figure 15 est ainsi de 176 ktC. Cependant, aux temps longs, en raison de la grande différence entre la constante de temps τ_F (307 ans) et les temps τ de transit ou de renouvellement du carbone dans les autres compartiments (sol profond exclu), on peut affirmer qu'après un délai de l'ordre de trois fois le temps de transit le plus élevé (racines mortes : 32,5 ans), soit un peu moins d'un siècle, l'évolution de l'ensemble de ces compartiments est « forcée » par les flux de carbone croissants issus des compartiments de bois vif et/ou par ceux, proportionnels, qui sont liés à la biomasse non ligneuse. Cette évolution devient alors semblable à celle du stock de carbone « bois vif », exponentielle avec la même constante de temps τ_F (cf. annexe E).

- La variation du stock global de carbone par rapport au scénario de référence, représentée par la courbe vert foncé de la figure 15, découle de ce qui précède. Sa valeur initiale est –275 ktC correspondant au contenu carbone de la récolte. L'évolution du stock est ensuite principalement liée à la dynamique des compartiments autres que ceux de bois vif avant d'être forcée par celle du seul bois vif après un laps de temps proche du siècle. Alors, la perturbation subie par ce stock s'atténue exponentiellement avec une constante de temps τ_F qui est l'inverse du taux de mortalité en volume. Pendant la phase transitoire, la variation de stock passe par un minimum dont la valeur exacte calculée est -489 ktC, 54ans après le supplément ponctuel de récolte. La réduction du stock de carbone est, à ce moment-là, plus importante encore que le contenu carbone du prélèvement (391 ktC) en raison d'un déstockage dont la litière et le sol minéral sont les principaux contributeurs.

- La courbe vert foncé de la figure 15 représente à la fois la variation de stock de carbone forestier et l'empreinte carbone de la récolte dans le cas où le bois sert de combustible (cf. section VI). L'empreinte est négative, manifestant une émission nette de carbone quelle que soit la plage de temps considérée après récolte. Initialement, cette empreinte correspond au contenu carbone du supplément ponctuel de récolte, ce qui est aisément compréhensible puisque celui-ci est brûlé. Aux temps « longs », les résultats semblent donner raison aux tenants de la « neutralité carbone » du bois énergie : l'empreinte tend vers zéro (il en est de même pour la variation du puits de carbone forestier qui est la dérivée de l'empreinte et est visualisée par la pente de la courbe). Les conséquences de la récolte finissent donc par s'effacer. Cette apparente résilience doit être imputée non à quelque miraculeuse « neutralité » mais simplement au fait qu'après une perturbation, la forêt retrouve naturellement son équilibre ainsi que le fait tout système linéaire invariant stable. Le mécanisme stabilisateur est ici la mortalité, qui est fonction croissante du volume sur pied : une réduction de volume s'accompagne d'une diminution de mortalité en sorte qu'à production biologique inchangée, l'accroissement varie positivement, ce qui tend à compenser la réduction du volume (cf. expression 3). Cependant, de manière transitoire, l'empreinte passe par un extremum marqué (489 ktC pour une récolte de 275 ktC), en raison du cumul d'émissions liées, d'une part, à la décomposition des pertes d'exploitation ligneuses et non ligneuses, d'autre part au déstockage dans des compartiments privés des apports en carbone qui leur provenaient des arbres avant qu'ils ne soient exploités (mortalité, renouvellement de biomasse non ligneuse). Cet extremum intervient au plus mauvais moment eu égard aux échéances climatiques de la fin de ce siècle (57 ans après récolte). Ces valeurs sont sujettes à révision lorsque les paramètres (facteurs d'expansion, constantes de temps, rapports de

ventilation de flux...) seront mieux connus mais les ordres de grandeur doivent être pris en considération. Ils ne doivent pas inciter à la récupération de tout ou partie des pertes d'exploitation (bois mort, racines mortes..), en partie responsables de cet extremum et de la date à laquelle il intervient. Une telle récupération serait très probablement contre-productive, par abaissement de la fertilité des stations mais surtout par les émissions résultant du déstockage de carbone dans les compartiments autres que ceux de bois vif. Notamment en ce qui concerne la litière et le sol qui contiennent à peu près autant de carbone que la biomasse forestière vivante, le bouleversement inévitable de ces deux compartiments en cas d'extraction des racines mortes, par exemple, se traduirait par une émission directe dans l'atmosphère bien supérieure au contenu carbone du combustible collecté.

- Si le bois récolté est conservé, son contenu carbone s'ajoute au stock de carbone forestier en sorte que la représentation de l'empreinte carbone est simplement translatée positivement de la valeur de ce contenu carbone suivant l'axe des ordonnées (figure 16 a). Dans le cas présent, l'empreinte est alors nulle à l'origine et tend asymptotiquement vers + 275 ktC pour les temps longs, son évolution restant semblable en tous points à celle correspondant à la récolte consumée, compte tenu de ce décalage. Les deux empreintes tracées sur la figure 16 a bornent la plage dans laquelle s'inscrirait celle d'une récolte mixte suivant les proportions de bois utilisé pour l'énergie, destiné à un usage durable ou voué à décomposition (émissions « extrinsèques » mises à part). Quel que soit l'usage du bois, l'empreinte carbone reste négative après récolte (émission) sur une durée qui va bien au-delà des perspectives humaines actuelles. Cette conclusion ne doit pas être considérée comme une invite à non-récolte : c'est l'augmentation des récoltes qui est en cause lorsque celles-ci ne sont pas anticipées par un accroissement de production permettant le renouvellement en égale quantité de la matière prélevée, ligneuse et non ligneuse, y compris les pertes. Par contre, s'il est normal de gérer et d'exploiter la forêt, d'en tirer des biens utiles, il est indispensable d'avoir conscience du coût carbone de chaque action : il est déraisonnable d'orienter la production forestière vers la fourniture d'énergie alors qu'on dispose de sources de chaleur non carbonées (nucléaire, solaire,...) et que la substitution du bois aux combustibles fossiles se traduit par un accroissement des émissions.



(a) (b)

Figure 16 - Empreintes carbone d'une variation ponctuelle de récolte de 10^6 m^3 de bois feuillus en forêt française selon que le bois récolté est brûlé ou conservé : augmentation (a), réduction (b)

La variation de prélèvement est supposée sans impact sur la production biologique brute

- Dans le cas d'une réduction ponctuelle de récolte de 10^6 m^3 de bois feuillus, l'effet est évidemment symétrique de celui de l'augmentation analysée ci-dessus, comme le montre la figure 16 b. La diminution de récolte a un impact positif sur l'empreinte carbone, quelle que soit la période de temps considérée, si cette diminution porte sur du bois qui était destiné à l'énergie ; l'impact est moindre lorsque cette diminution porte sur du bois qui devait être conservé mais reste quand même positif sur une longue durée (au-delà du siècle). Là encore, les deux courbes délimitent la plage de variation de l'empreinte selon les proportions de bois primitivement récolté qui étaient destinées à une utilisation comme combustible ou à des usages durables.

b) Empreinte carbone d'une augmentation de récolte en échelon

Les interprétations et commentaires précédents, à propos d'un exemple numérique précis, ont en réalité une portée générale. Dans le cadre d'approximation adopté (linéaire invariant), la réponse impulsionnelle d'un système caractérise entièrement ce système du point de vue de la relation entrée-sortie (ou excitation-réponse), c'est-à-dire permet de prévoir son comportement pour une sollicitation quelconque (cf. annexe D, section 2-1, paragraphe d). Notamment, toute opération linéaire effectuée sur l'entrée se traduit par la même opération sur la « sortie » ; il en est ainsi de la sommation, de la multiplication par une constante, de la dérivation par rapport au temps ou de l'intégration. Par exemple, pour une augmentation de récolte en échelon de 10^6 m^3/an à partir d'une année « 0 », les empreintes carbone dans les deux hypothèses de combustion et de conservation des bois correspondraient aux intégrales de celles de la figure 16 a et sont représentées par les courbes de couleur verte de la figure 17 : l'échelon peut, en effet, être considéré comme le résultat de l'intégration d'une impulsion ; la production biologique brute du scénario de référence est, ici encore, supposée inchangée.

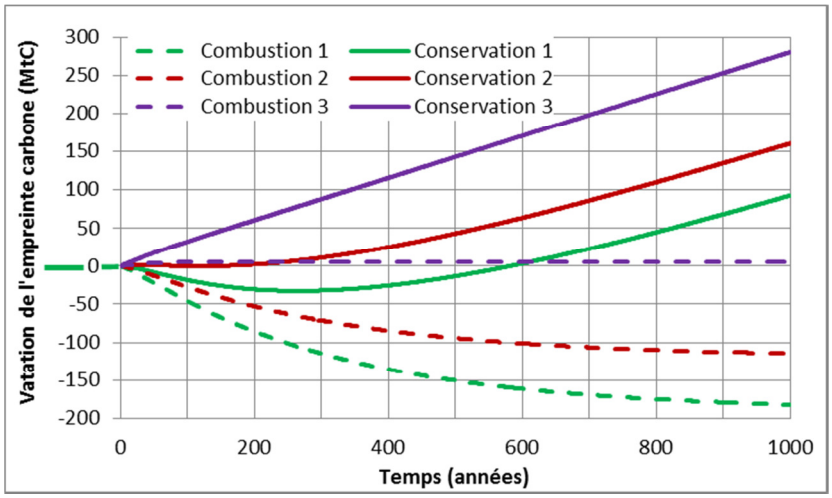


Figure 17 – Empreintes carbone pour un supplément de récolte de 10^6 m^3/an de bois feuillus, sans et avec ajustement de production biologique.

Courbes vertes : maintien de la production annuelle du scénario de référence ; courbes rouges : augmentation de la production à hauteur des pertes annuelles ; courbes violettes : augmentation à hauteur du prélèvement.
Courbes en trait plein : conservation du bois récolté. Courbes tiretées : combustion.

Si la production biologique brute se trouve modifiée par des actions sylvicoles directes ou affectée en répercussion de l'augmentation de récolte, il suffit de considérer à part l'effet de cette variation de production et de le rajouter algébriquement à celui de la variation de récolte. La figure 17 en donne l'illustration en même temps qu'elle résume la dynamique des échanges de carbone entre la forêt et l'utilisation de son bois, d'une part, l'atmosphère, d'autre part. Trois situations types sont représentées, avec, pour chacune, deux cas extrêmes d'utilisation du bois récolté : combustion ou conservation.

Dans le scénario 1 (courbes vertes), la production biologique est supposée inchangée par rapport à celle du scénario de référence, malgré la suppression d'arbres producteurs, ce qui exige déjà des actions de boisements, reboisements ou d'amélioration des peuplements pour maintenir le niveau de production antérieur à l'augmentation. L'empreinte carbone dans le cas de combustion est négative (émission). L'empreinte carbone dans le cas de la conservation se déduit de la précédente en ajoutant le contenu carbone cumulé des récoltes, qui croît linéairement de 275 ktC par an. Cette empreinte est moins défavorable que la précédente mais reste négative pendant plusieurs siècles. Dans le scénario 2, on augmente la production biologique à hauteur des pertes annuelles aériennes et racinaires, ligneuses et non ligneuses : l'empreinte carbone pour le cas de combustion s'améliore mais reste négative et celle pour le cas de conservation devient positive, mais d'abord de manière peu significative. Ce n'est qu'avec le scénario 3 d'une augmentation de production biologique à hauteur du prélèvement (récolte + pertes) que l'on parvient à une empreinte carbone non négative mais quasiment nulle encore dans le cas de la combustion du bois récolté ; l'empreinte carbone dans le cas de la conservation correspond alors approximativement au contenu carbone cumulé des récoltes annuelles (capture effective).

On trouvera dans l'annexe D, section 2-1, paragraphe d, un aperçu des principes permettant la généralisation des résultats pour des variations quelconques de récolte et de production biologique.

c) Un scénario « au fil de l'eau » [Annexe D, section 3]

Pour évaluer de manière plus concrète l'impact « effet de serre » de diverses options de prélèvement et d'utilisation des récoltes, il est bon de disposer d'un scénario de référence portant sur l'évolution possible 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 2010 (figure 13) et de dérouler, sur la base du « modèle » des figures 12 et 14, un scénario « au fil de l'eau » c'est-à-dire sans modification de paramètres (constantes de temps indiquées sur la figure 14).

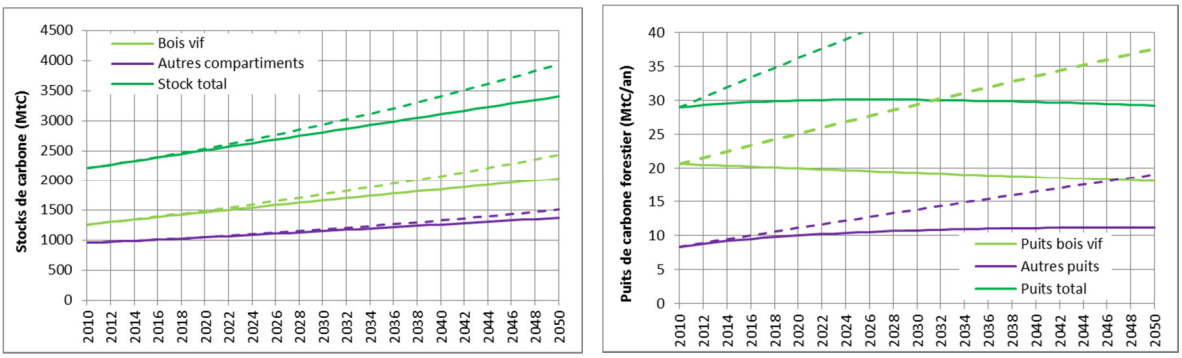
Pour dérouler le scénario, encore faut-il indiquer des évolutions plausibles pour les productions ligneuses et les prélèvements. Selon les données récentes de l'inventaire forestier, on ne décèle pas de variation de la production biologique ligneuse sur une période de presque une décennie courant avant même l'année 2010 choisie pour début du scénario. Cependant, des données plus anciennes (antérieures à 2005) indiquaient, une progression régulière de cette production d'environ 10^6 m^3/an^2 depuis le début des années 1980. Pour encadrer le champ du possible, on envisage donc deux hypothèses pour le scénario « au fil de l'eau » : productions annuelles constantes (valeurs indiquées dans le tableau 2) ; productions annuelles linéairement croissantes de $0{,}84\times10^6$ m^3/an^2 (feuillus) et $0{,}12\times10^6$ m^3/an^2 (résineux), soit 0,48 MtC/an^2 et 0,045 MtC/an^2 respectivement, valeurs récemment suggérées par l'IGN. En ce qui concerne les prélèvements, les données d'inventaire sont trop peu

nombreuses et les marges d'incertitude trop importantes pour qu'il soit possible de déceler une tendance nette dans les variations récentes et on suppose donc constants ces prélèvements, pour les feuillus aussi bien que pour les résineux (cf. tableau 2).

	Production		Prélèvement	
	10^6 m^3/an bois fort tige	MtC/an	10^6 m^3/an bois fort tige	MtC/an
Feuillus	54,2	30,7	20,3	11,5
Résineux	36,3	13,8	21,2	8,05

Tableau 2 – Valeurs initiales (2010) des productions biologiques brutes et prélèvements annuels de bois vif dans les peuplements feuillus et résineux.

Dans ces conditions, on est conduit aux évolutions des stocks de carbone et des contributions au puits de carbone représentées sur la figure 17 pour le bois vif, les autres compartiments et pour l'ensemble. 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 (facteur4).



(a) **(b)**

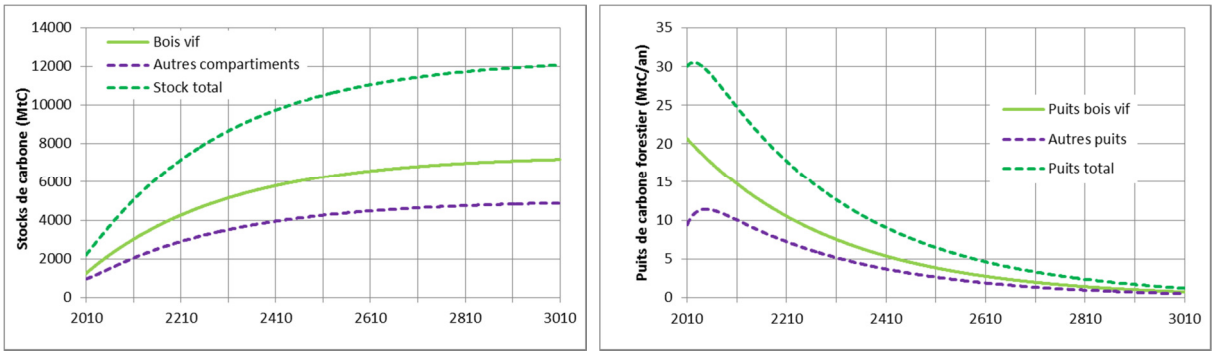
Figure 17 - Évolutions des stocks de carbone (a) et des contributions au puits de carbone forestier (b) dans un scénario « au fil de l'eau »

Les tracés continus correspondent à l'hypothèse de production brute constante,
les tracés tiretés à celle de production brute linéairement croissante.
Le stock de carbone dans les couches profondes du sol (870 MtC au-delà de 10 cm) est admis comme invariable sur la période de temps considérée et n'est pas pris en compte.

L'accroissement des stocks est dicté par une production biologique nette (mortalité déduite) qui, dans les deux hypothèses, est et reste plus élevée que le prélèvement pour la période 2010-2050 considérée (cf. bilan 12). En ce qui concerne le bois vif, dans l'hypothèse de production constante (tracés pleins), à prélèvement annuel lui-même constant, l'accroissement se réduit quelque peu au fil du temps en raison de la diminution de production nette qu'entraîne l'augmentation de mortalité. Une conséquence est une diminution sensible de la contribution du bois vif au puits de carbone forestier, de 20,6 MtC/an en 2010 à 18 MtC/an en 2050. Cette diminution est approximativement compensée par l'augmentation de la contribution des autres compartiments, en sorte que le puits global forestier reste sensiblement constant sur la période considérée à un niveau moyen de 29,8 MtC/an.

Le puits de carbone du scénario « au fil de l'eau » à l'horizon 2050 s'établit donc à un niveau proche de 30 MtC/an (110 $MtCO_2$/an) dans l'hypothèse d'une production biologique constante, et à ≈ 57 MtC/an (210 $MtCO_2$/an) dans l'hypothèse d'une production biologique croissant linéairement de $0{,}96\times10^6$ m^3/an^2. Il est intéressant de situer ces valeurs dans la perspective d'une réduction d'un facteur 4 des émissions nationales de CO_2 à l'horizon 2050 par rapport à leur niveau de 1990. Pour l'année 1990, l'émission de CO_2 en France métropolitaine a été de ≈ 440 $MtCO_2$ (≈ 120 MtC). L'objectif d'émission pour 2050 devrait donc être affiché à 110 $MtCO_2$/an (30 MtC/an). Le scénario « au fil de l'eau » promet ainsi de rendre la France « neutre » et probablement « puits net de carbone », pourvu qu'on le laisse se dérouler (les augmentations de récolte pour l'énergie actuellement prévues apparaissent inconsidérées) et que la division par 4 des émissions « fossiles » soit effective.

Si l'on prolongeait le scénario à production biologique brute 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 (figure 18). Cet hypothétique état d'équilibre 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 près de 13 GtC (non compris le carbone du sol profond, au-delà de 10 cm) dont 7,4 GtC dans le seul bois vif, pour un volume « bois fort tige » sur pied de $14{,}3\times10^9$ m^3, soit, en densité pour une surface forestière supposée inchangée de 16 millions d'hectares, un stock moyen de 810 tC/ha dont 460 tC/ha pour le bois vif avec un volume de près de 900 m^3/ha.



(a) (b)

Figure 18 - Évolutions théoriques à long terme des stocks de carbone (a) et des contributions au puits de carbone forestier (b) dans un scénario « au fil de l'eau »

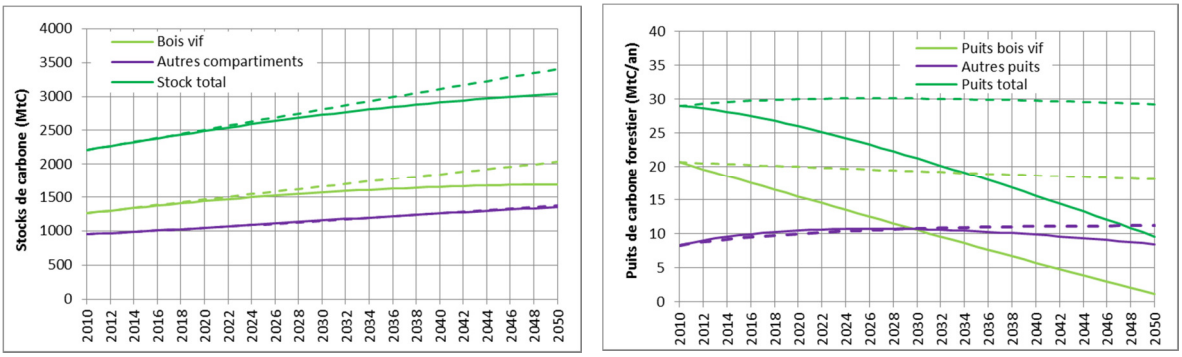
Le stock de carbone dans les couches profondes du sol (au-delà de 10 cm) n'est pas pris en compte

Ces chiffres qui, dans le scénario « au fil de l'eau », ne sont approchés qu'après de nombreux siècles en raison des valeurs élevées des constantes de temps τ_F et τ_R, frappent par les ordres de grandeur en masse, volume et durée, mais sont anecdotiques, l'invariance de la production biologique, du prélèvement, de la mortalité et des constantes de temps caractéristiques étant invraisemblable sur une telle durée. Cependant, Pregitzer et Euskirchen (2004) estiment à près de 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'indiquerait le scénario « au fil de l'eau » en laissant s'écouler

un laps de temps comparable (cf. figure 18 a). 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 la croissance par des prélèvements injustifiés.

d) Scénario d'augmentation de récolte de bois pour l'énergie [Annexe D, section 4]

La France a des objectifs ambitieux en matière de transition énergétique s'appuyant sur les énergies renouvelables dont la part dans la consommation finale devrait s'élever à 23 % en 2020 et 32 % en 2030. Une place privilégiée est réservée aux bioénergies, parmi lesquelles le bois énergie, censées participer à la réduction des émissions de gaz à effet de serre en vertu de leur prétendue « neutralité carbone ». Sur la période 2010-2020, le Plan d'action national en faveur des énergies renouvelables prévoit une mobilisation accrue de la ressource forestière pour un équivalent énergétique de l'ordre de +2,8 à +5 millions de tonnes-équivalent-pétrole. Dans le scénario, ces deux chiffres sont retenus comme hypothèse « basse » (+2,8 Mtep) et hypothèse « haute» (+5Mtep). En admettant que les récoltes supplémentaires portent sur les bois feuillus et résineux selon leur proportion dans le volume total de bois sur pied (65% et 35% respectivement), les hypothèses « basse » et « haute » correspondent à des récoltes 2020 en augmentation de $12{,}4 \times 10^6$ m^3 et $22{,}1 \times 10^6$ m^3 réels, respectivement, par rapport à celles de 2010,. On suppose, dans les deux hypothèses, que l'augmentation de récolte pour l'énergie est répartie linéairement sur la durée théorique du Plan (10 ans) les récoltes de bois d'œuvre et de bois d'industrie étant maintenues au même niveau qu'en 2010. Enfin, pour ne pas tomber dans une complexité qui cacherait l'essentiel, on se réfère au scénario « au fil de l'eau » à production biologique annuelle constante annuelle fixe.

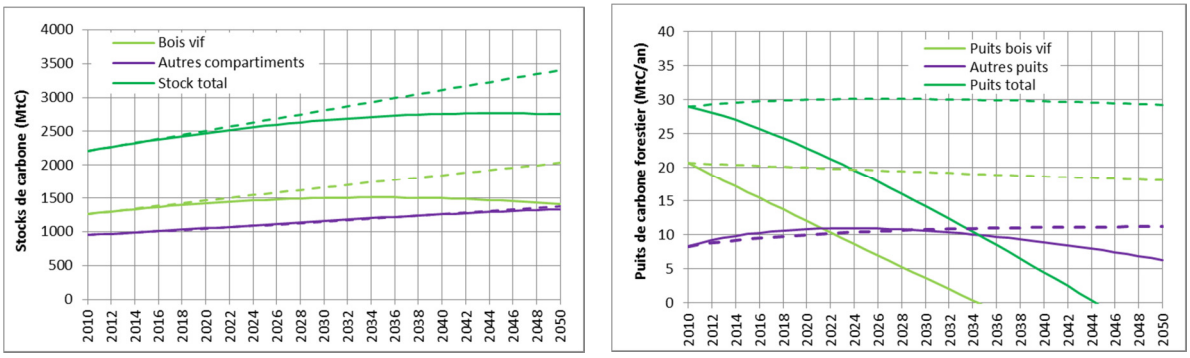


(a) (b)

Figure 19 – Évolutions des stocks de carbone et des composantes du puits de carbone forestier suivant un scénario d'augmentation de récolte pour l'énergie de $1{,}24 \times 10^6$ m^3/an^2

(Hypothèse « basse » ; les courbes en tiretés correspondent au scénario « au fil de l'eau »)

Dans ces conditions, on est conduit aux évolutions des stocks et puits de carbone représentées sur les figures 19 (hypothèse « basse ») et 20 (hypothèse « haute »), pour le bois vif, les autres compartiments et pour l'ensemble. La période de temps couverte par le scénario va au-delà de 2020 car la loi de 2015 relative à la transition énergétique pour une croissance verte qui fixe des objectifs globaux de 32% d'énergies renouvelables dans le « mix » énergétique français à l'horizon 2030, devrait solliciter la forêt au moins autant que le Plan d'action national en faveur des énergies renouvelables et nombre d'études prospectives projettent au-delà (jusqu'en 2050) la croissance de la demande en bois énergie.



(a) (b)

Figure 20 – Évolutions des stocks de carbone et des composantes du puits de carbone forestier suivant un scénario d'augmentation de récolte pour l'énergie de $2{,}21 \times 10^6$ m^3/an^2

(Hypothèse « haute » ; les courbes en tiretés correspondent au scénario « au fil de l'eau »)

Dans l'une et l'autre des hypothèses d'accroissement de la récolte, l'intensité du puits de carbone forestier est sévèrement réduite par rapport à celle du scénario « au fil de l'eau. Dans l'hypothèse « haute », la contribution à ce puits du stockage de carbone dans les arbres vifs s'annule vers 2035 et change de signe : le prélèvement devient supérieur à la production biologique nette en sorte que la biomasse forestière décroît. Un tel évènement interviendrait aussi, dans l'hypothèse « basse », au-delà de 2050. Se pose donc la question de la compatibilité des objectifs de récolte avec la pérennité de la forêt sauf, naturellement, si une augmentation de la production biologique, naturelle ou voulue, pouvait compenser celle des prélèvements. L'inversion du puits de carbone total (la forêt devient « source » de carbone vis-à-vis de l'atmosphère) est quelque peu différée par rapport à celle du bois vif en raison du stockage transitoire de carbone résultant de l'accumulation des pertes d'exploitation aériennes et racinaires.

L'empreinte carbone, définie comme étant la balance capture-émission du système étudié intégrée sur une période de temps donnée, est représentée par la variation, sur cette période, du stock total de carbone dans le système. Dans le cadre d'approximation choisi (linéarité, invariance), la différence entre empreintes carbone du scénario actuel et du scénario de référence représente l'empreinte carbone de l'augmentation de récolte même ; cette augmentation de récolte étant promise à combustion, aucune variation de stock de carbone hors forêt n'est à considérer. Les tableaux 4 et 5 récapitulent, pour les deux hypothèses d'augmentation de récolte ainsi que pour le scénario de référence, les valeurs des empreintes étendues aux périodes 2010-2020 (Plan d'action national en faveur des énergies renouvelables), 2010-2030 (prolongation dans le cadre de la Loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte) et 2010-2050 (objectif de division par 4 des émissions de gaz à effet de serre). À partir de l'empreinte carbone de l'augmentation de récolte, il est possible de définir un facteur d'émission apparent (dernière ligne de chacun des tableaux, émissions « extrinsèques » mises à part) dont la comparaison aux facteurs d'émission des principaux combustibles fossiles (charbon : 1,088, pétrole : 0,833, gaz naturel : 0,638 tC/tep) conduit à une conclusion sans appel : la substitution énergétique accroît les émissions au lieu de les réduire. L'argument de « neutralité carbone » est donc vain. Encore faut-il souligner que les résultats portés dans les tableaux 4 et 5 supposent que la production biologique n'est pas affectée par l'augmentation des prélèvements et reste celle du scénario de référence « au fil de l'eau », ce qui est une hypothèse discutable.

Hypothèse « basse »	2010-2020	2010-2030	2010-2050
Empreinte carbone du scénario de référence (MtC)	+296,1	+597,0	+1191,6
Empreinte carbone du scénario actuel (MtC)	+277,3	+514,5	+826,1
Empreinte carbone de l'augmentation de récolte (MtC)	–18,8	–82,5	–365,5
Contenu énergétique de la récolte (Mtep)	14	56	224
Facteur d'émission apparent de la récolte (tC/tep)	1,34	1,47	1,63

Tableau 4 – Empreinte carbone et facteur d'émission apparent de l'augmentation de récolte
(Hypothèse « basse » : augmentation de $1,24 \times 10^6$ m^3/an^2)

Hypothèse « haute »	2010-2020	2010-2030	2010-2050
Empreinte carbone du scénario de référence (MtC)	+296,1	+597,0	+1191,6
Empreinte carbone du scénario actuel (MtC)	+262,5	+449,5	+537,9
Empreinte carbone de l'augmentation de récolte (MtC)	–33,6	–147,5	–653,7
Contenu énergétique de la récolte (Mtep)	25	100	400
Facteur d'émission apparent de la récolte (tC/tep)	1,34	1,47	1,63

Tableau 5 – Empreinte carbone et facteur d'émission apparent de l'augmentation de récolte
(Hypothèse « haute » : augmentation de $2,21 \times 10^6$ m^3/an^2)

L'augmentation régulière du facteur d'émission apparent en fonction de la période considérée provient principalement de la décomposition des pertes d'exploitation, plus ou moins différée selon leur nature, ligneuses aériennes et racinaires, non ligneuses transmises à la litière et au sol minéral, et d'un déstockage progressif, notamment dans ces deux derniers compartiments. Ces résultats chiffrent le coût carbone exorbitant des politiques de développement du bois énergie. Le choix d'un scénario « au fil de l'eau » pour référence ne restreint pas la généralité de la conclusion : comme cela a été souligné dans le paragraphe a) de la présente section, l'effet d'une variation de récolte ou de prélèvement (ou de production) serait le même vis-à-vis de tout autre scénario dans les limites d'approximation du modèle : linéarité, invariance.

IX – Conserver le bois récolté ? [Annexe D, section 2]

Les produits bois conservent pratiquement intact leur contenu carbone pendant leur temps de vie. Aussi, l'utilisation du bois comme matière ou matériau est-elle généralement considérée comme un moyen de stockage direct du carbone puisé par la forêt dans l'atmosphère en même temps qu'un moyen indirect de réduction des émissions globales, par substitution de produits bois à des produits d'empreinte carbone plus négative. Cette conception doit cependant être nuancée et ses limites précisées.

- ✓ La pratique actuelle est de valoriser comme combustible tout ou partie des déchets ligneux de fabrication et les produits bois non recyclés en fin de vie, les émissions de combustion correspondantes n'étant pas comptabilisées au nom de la « neutralité carbone » des usages combustibles de la biomasse. Ceci introduit un biais dans la comparaison des empreintes carbone des produits bois et des produits réalisés avec d'autres matériaux, et, notamment, les valeurs actuellement avancées pour le « coefficient de substitution » rapportant au mètre cube de produit bois utilisé la masse de CO_2 « évitée » doivent être révisées à la baisse.

- ✓ Le stockage de carbone hors forêt n'est effectif que si le stock Q_P dans les produits en usage ou placés en décharge est croissant, ce qui impose que le flux de carbone lié aux produits nouvellement fabriqués soit supérieur à celui rendu à l'atmosphère par combustion ou décomposition des objets en fin de vie.

- ✓ Pour un volume de récolte donné, les orientations sont de simple bon sens : réduire la part de récolte destinée à l'énergie, diminuer aussi la part relative des déchets de bois en privilégiant les applications de bois massif, dans la construction par exemple, augmenter la durée de vie des produits en améliorant leur robustesse, placer en décharge ou enterrer les déchets ligneux de fabrication et les produits bois en fin de vie : les bois mis en terre, après une phase de libération de méthane récupérable de la même manière que le biogaz d'origine agricole, conservent pendant des siècles ou des millénaires une forte proportion de leur masse initiale de carbone.

- ✓ Une augmentation significative du stock Q_P sur un long terme réclame une augmentation du volume de récolte pour des bois appropriés. Or, sans avoir été anticipée par un accroissement adéquat de la production biologique, l'augmentation de récolte se traduit négativement sur l'empreinte carbone de la forêt et de l'utilisation de son bois, pendant plusieurs siècles au moins, même lorsque le bois est entièrement conservé. La condition d'adéquation de la production biologique au prélèvement est cependant moins sévère dans le cas du bois conservé (compensation des pertes) que dans le cas du bois combustible (compensation des pertes <u>et</u> des émissions de combustion).

X – CONCLUSION

La « neutralité carbone » de l'emploi du bois (et autres biomasses) comme combustible, est un concept prégnant mais trompeur. Associé à celui de « source renouvelable » il paraît offrir à l'humanité, par substitution de biocombustibles aux combustibles fossiles, une solution naturelle « verte » pour ses besoins d'énergie, sans influence sur le climat. Aussi a-t-on longtemps accepté cette « neutralité » comme vérité établie, sous la seule contrainte de « gestion durable des forêts », euphémisme un peu vague censé équivaloir à la condition d'équilibre du cycle du carbone « biogénique ». Les conséquences sont graves car affirmer *a priori* que l'émission de combustion du bois se trouve compensée par la capture du CO_2 nécessaire à l'élaboration de la matière ligneuse, revient à soustraire de fait la forêt et l'utilisation de son bois aux obligations d'une comptabilité carbone généralement exigée pour toute activité humaine, et encourage abusivement la consommation de bois pour l'énergie sans évaluation préalable d'impact. Et la question d'une gestion des forêts propre à atténuer le changement climatique se trouve, dans le cadre conceptuel de « neutralité », éludée par avance.

Or, l'assertion de « neutralité » est fausse, inspirée par une mauvaise interprétation de règles de comptabilité carbone édictées dans le cadre d'application du protocole de Kyoto. Les choses sont plus compliquées.

a) Simple conséquence du principe de conservation, la variation du stock total de carbone en forêt et, hors forêt, dans la matière ligneuse extraite, équivaut à la masse de carbone échangée avec l'atmosphère. Autrement dit, l'empreinte carbone de la forêt et de l'utilisation de son bois sur une période de temps déterminée (balance entre le total des captures de carbone et des émissions), s'identifie à la variation, sur cette période, de la somme du stock de carbone forestier et de celui contenu dans les produits ligneux issus des récoltes. Par ailleurs, l'effet d'une action sur l'évolution d'un système se mesure par rapport à l'évolution du système en l'absence d'action : ainsi, l'impact « effet de serre » d'une récolte de bois en forêt se détermine par rapport à l'empreinte carbone de la forêt en l'absence de cette récolte ; de même, l'impact de la combustion du bois récolté doit être évalué par rapport à celui de sa non-combustion, c'est-à-dire de sa conservation.

Le respect de ces deux principes conduit, dans l'analyse d'impact de l'emploi du bois comme combustible à des conclusions opposées à celles auxquelles mène l'assertion de neutralité :

- ✓ La plus immédiate est triviale : la combustion du bois s'accompagne de l'émission dans l'atmosphère de son contenu carbone, soit sensiblement 50 % de sa masse anhydre. Le rapport de ce contenu à l'énergie libérée par la combustion définit le facteur d'émission « intrinsèque ». Celui-ci est de 1,13 tonne de carbone par tonne-équivalent-pétrole (1,13tC/tep, une tep équivalent à 41,87 gigajoules) alors qu'il est souvent prétendu nul. Par comparaison avec les facteurs d'émission intrinsèques des combustibles fossiles (charbon : 1,09, pétrole : 0,83, gaz naturel : 0,64 tC/tep), le bois se place donc, avec peut-être le lignite, comme le combustible le plus émissif.

- ✓ L'assertion de neutralité carbone conduit à penser que la substitution du bois aux combustibles fossiles « évite » leurs émissions de combustion. Or, en substituant le bois à un combustible fossile, on remplace l'émission de celui-ci par celle de celui-là ; il y aurait bénéfice si le facteur d'émission du bois était inférieur à celui du combustible fossile substitué : ce n'est pas le cas. Et on ne peut invoquer la compensation de l'émission de combustion du bois par le carbone puisé dans l'atmosphère par la forêt pour constituer la biomasse : si le bois n'était pas brûlé, la forêt aurait la même activité photosynthétique, puiserait de même du carbone dans l'atmosphère et c'est donc la capture qui prévaudrait. Les complications que peut apporter la prise en compte d'émissions « extrinsèques » (émissions « amont » liées à l'exploitation, au transport, au raffinage ou au conditionnement, à la distribution des combustibles ... et émission, lors de la combustion, de petites quantités de gaz à effet de serre autres que le dioxyde de carbone) ne modifient pas le fait que, d'ordinaire, la substitution du bois à des combustibles fossiles accroît les émissions au lieu de les réduire.

- ✓ Le bilan de substitution du bois à des combustibles fossiles est alourdi, par rapport à la simple comparaison des facteurs d'émission, si l'on prend en compte l'impact négatif de la récolte sur l'empreinte carbone de la forêt même. La récolte de bois en forêt laisse en effet sur place des « rémanents » ligneux et non ligneux promis à décomposition plus ou moins rapide avec renvoi dans l'atmosphère de leur contenu carbone sous forme de CO_2. Il s'agit notamment des branchages et débris abandonnés sur coupe (représentant souvent entre 10 et 15 % du

volume de récolte), des racines ligneuses laissées en place (près du quart du volume des arbres exploités) et de biomasse non ligneuse (feuillage, racines fines, mycéliums des champignons mycorhiziens... comptant pour 6 à 7 % de la biomasse totale). L'ensemble de ces pertes se chiffre à environ 50 % de la biomasse récoltée et de son contenu carbone et il faut donc admettre que le facteur d'émission « apparent » du bois combustible est augmenté d'autant par rapport au facteur d'émission intrinsèque, sans même compter les émissions « amont ». Ces pertes sont difficilement compressibles et il serait même inopportun de vouloir les réduire. Par exemple, le bouleversement de la litière et du sol en cas d'extraction des racines des arbres abattus se traduirait par une émission directe dans l'atmosphère vraisemblablement bien supérieure au contenu carbone du combustible collecté. Toutefois, ces « pertes » à la récolte (auxquelles s'adjoignent quelques autres causes d'évasion de carbone) existent quelle que soit la destinée du bois récolté et ne sont donc pas spécifiques du bois énergie. Il faut encore compter avec l'impact de la récolte sur la production forestière ; selon les conditions, cet impact peut-être positif (rajeunissement de peuplements vieillis et devenus improductifs, par exemple), ou irrémédiablement négatif (déforestation, par exemple). L'impact est bien plus souvent négatif car le prélèvement s'exerçant généralement sur les arbres vifs, on supprime du coup leur production ligneuse. Mais s'il ne s'agit pas, là encore, d'une spécificité du bois énergie, l'impact de la récolte sur la production biologique doit néanmoins être pris en compte dans le bilan de substitution du bois à des combustibles fossiles.

b) Avec une densité de l'ordre de 0,5 et un contenu carbone de 50 % en masse sèche, un mètre-cube de bois stocké en forêt ou hors forêt retire à l'atmosphère 250 kilogrammes de carbone soit pas loin d'une tonne de CO_2. L'objectif étant l'atténuation de l'effet de serre, et étant établi que la substitution énergétique est contraire à cet objectif, tout devrait être fait pour maximiser ce stockage sur une durée compatible avec les échéances climatiques.

- ✓ En ce qui concerne le stock de carbone forestier, les leviers d'action possibles sont indiqués par le bilan suivant, restreint ici, pour être concis, à la seule biomasse ligneuse :

  accroissement = production biologique – mortalité – prélèvement

  dont les différents termes représentent des flux annuels de carbone. Par production biologique, on entend la masse nette de carbone annuellement captée dans l'atmosphère et stockée dans la biomasse forestière ; elle dépend essentiellement de l'étendue du domaine forestier considéré et de la vigueur de ses peuplements. Le prélèvement correspond à la somme du contenu carbone de la récolte et de celui des pertes signalées plus haut. Le flux de mortalité est celui du carbone des arbres morts naturellement (hors prélèvement) et, étant en relation avec leur durée de vie, introduit dans la dynamique du carbone forestier les plus longues de ses constantes de temps (plusieurs siècles, statistiquement, tant en ce qui concerne les feuillus que les résineux).

  Pour la forêt métropolitaine française dans sa situation des années 2010, choisie comme support d'illustration, la production biologique de carbone ligneux s'élève approximativement à 44,5 millions de tonnes par an (44,5 MtC/an), la mortalité à 4,3 MtC/an et le prélèvement à 19,6 MtC/an pour une récolte effective de 13,7 MtC/an. L'accroissement correspondant, c'est-à-dire la contribution des arbres vifs au puits de carbone forestier est donc d'environ 20,6

MtC/an. En tenant compte des variations de stock de carbone dans les compartiments autres que ceux de bois vif (bois mort, racines mortes, feuillage et racines fines, litière et sol) on parvient à une valeur de puits total de 28,9 MtC/an, soit 109 $MtCO_2$/an, permettant de compenser près de 25% des émissions nationales de CO_2 (452 $MtCO_2$ en 2010).

Le bilan ci-desssus indique clairement qu'à volume de récolte inchangé et sans maîtrise de la mortalité des arbres, une amélioration du puits de carbone forestier (accroissement), passe par une augmentation de production biologique. Celle-ci peut être obtenue par l'extension du domaine boisé (reboisements et boisements) et/ou des soins sylvicoles apportés aux peuplements en place ; l'amélioration est toutefois différée par rapport aux actions entreprises, compte tenu du temps d'installation ou de réaction des arbres. L'alternative est une diminution de prélèvement, donc de récolte, dont l'effet, par contre, est immédiat. Cette diminution est rendue possible en la portant sur la part de récolte actuellement consacrée, de manière contreproductive, à l'énergie. Sur les 13,7 MtC/an de récolte cités pour la forêt française (correspondant à un prélèvement de 19,6 MtC/an), la part directe du bois énergie est de 5,8 MtC, ce qui permet d'envisager, par substitution inverse à partir de sources d'énergie « non carbonées » (ou « moins carbonées »), une augmentation significative du puits de carbone forestier jusqu'à environ 8 MtC/an.

- ✓ En ce qui concerne le stock de carbone des produits bois, sans avoir été anticipée par un accroissement adéquat de la production ligneuse, une augmentation de la récolte pour augmenter ce stock se traduirait par un affaiblissement du puits de carbone forestier que ne compenserait en aucun cas le stockage hors forêt dans les produits ligneux, compte tenu des pertes.

  Par contre, il est possible, pour un volume de récolte donné, d'orienter l'utilisation des bois vers le stockage maximum de carbone. L'analyse du problème conduit à des conclusions de simple bon sens : réduire la part de récolte destinée à l'énergie, diminuer aussi la part relative des déchets de bois en privilégiant les applications de bois massif, dans la construction par exemple, augmenter la durée de vie τ_{vie} des produits en améliorant leur robustesse, conserver à l'abri de l'humidité et des insectes xylophages ou placer en décharge ou encore enterrer les déchets ligneux de fabrication et les produits bois non recyclables en fin de vie, au lieu de les brûler (les bois mis en terre, après une phase de libération de méthane récupérable de la même manière que le biogaz d'origine agricole, conservent pendant des siècles ou des millénaires une forte proportion de leur masse initiale de carbone).

c) Les conclusions ci-dessus s'inscrivent dans une vision quasi-statique de la forêt : la variable temps n'apparaît pas. Or la forêt est un système dynamique dont l'évolution joue avec un poids considérable sur les échanges de carbone entre la terre et l'atmosphère et il importe de prévoir ce que pourront être les répercussions futures, sur l'empreinte carbone, de décisions prises aujourd'hui en matière d'investissements forestiers et de récoltes. En considérant, en première approche, que la dynamique du stock de carbone forestier est linéaire et invariante vis-à-vis de variations de production biologique et /ou de prélèvement, comme le suggère le bilan rappelé plus haut, on peut accéder, par l'analyse de cas simples, à des conclusions aisément généralisables concernant les tendances d'évolution et les ordres de grandeur.

- ✓ Quelle que soit l'évolution de la forêt, naturelle ou planifiée, l'effet de toute perturbation apportée par une modification transitoire de production biologique ou de prélèvement (ou de récolte) ne s'amortit qu'après un temps très long qui se chiffre en plusieurs unités de la plus grande des constantes de temps caractéristiques des différents compartiments forestiers. Celle-ci se trouve être le temps moyen de résidence du carbone dans les arbres vifs, hors prélèvement, et se compte en siècles.

- ✓ Après une récolte, la décomposition des pertes d'exploitation, aériennes et racinaires, ligneuses et non ligneuses, et le déstockage de carbone dans les compartiments forestiers privés des apports qui leur parvenaient des arbres exploités (mortalité naturelle, renouvellement de biomasse non ligneuse) sont sources d'émissions, étalées dans le temps, dont le cumul peut être de l'ordre de grandeur du contenu carbone de cette récolte. Il en résulte que l'empreinte de la récolte même, dont la valeur initiale correspond précisément à ce contenu carbone, évolue pour présenter un extremum marqué après un laps de temps régi par les constantes de temps de dégradation et de déstockage (quelques dizaines d'années) avant de tendre lentement vers zéro au fur et à mesure que l'évolution du système forestier retrouve son cours normal après perturbation, ce qui nécessite théoriquement plusieurs siècles. Avec les valeurs de paramètres caractérisant la forêt française dans son ensemble, par exemple, cet extremum intervient quelque cinquante ans après récolte soit à un mauvais moment compte tenu des échéances climatiques. Il en résulte qu'à production biologique maintenue inchangée, une augmentation de récolte a un impact effet de serre toujours négatif (émission) si le bois récolté est utilisé comme combustible, pouvant être positif s'il est conservé, mais seulement après un délai qui, en général, va bien au-delà du siècle.

- ✓ La production biologique brute joue vis-à-vis des compartiments de bois vif, au signe près, le même rôle que le prélèvement (cf. le bilan indiqué plus haut). La prise en considération des autres compartiments ne modifie pas sensiblement cette équivalence. Aussi, en augmentant la production biologique, on peut compenser les émissions liées aux pertes et celles dues à l'utilisation du bois récolté comme combustible mais, en tout état de cause, la « neutralité carbone » ne peut être réalisée qu'à condition que l'augmentation de production soit à la hauteur de celle du prélèvement (récolte + pertes) et ce, de manière synchrone.

  Encore faut-il souligner que, devant la menace climatique, la « neutralité carbone » de la forêt et de l'utilisation de son bois ne saurait être une fin en soi. Au contraire, une réduction de récolte est toujours bénéfique du point de vue de l'empreinte carbone d'ensemble (forêt et utilisation de son bois), d'autant mieux que cette réduction porte sur du bois qui était primitivement destiné à l'énergie.

d) Toujours dans le cadre d'approximation de linéarité et d'invariance, il est possible de dérouler simplement des scénarios d'évolution de la forêt, selon diverses hypothèses d'intensité des prélèvements et d'utilisation des bois récoltés, et de comparer les empreintes carbone correspondantes. En nombre nécessairement limités, les scénarios présentés dans ce mémoire se rapportent à la forêt métropolitaine française, qui est documentée par les inventaires forestiers de l'Institut Géographique National. Compte tenu des approximations faites dans la description de la dynamique forestière et des incertitudes sur les valeurs de paramètres, les résultats ne doivent être considérés que dans leurs tendances et ordres de grandeur, mais ils permettent d'affirmer,

relativement à la politique forestière nationale, plusieurs conclusions de grande importance, transposables à d'autres pays.

- ✓ Partant de conditions initiales correspondant à l'état de la forêt en 2010, un scénario « au fil de l'eau », c'est-à-dire sans modification de la tendance relevée à cette époque pour les variations de production biologique et de prélèvement ligneux, indique une forte croissance du stock de carbone de l'ordre de 30 MtC/an au minimum, pendant plusieurs décennies au moins, et promet une « réserve potentielle » de capture de carbone à long terme de plusieurs gigatonnes. Un objectif réitéré pour la France est une division par 4 des émissions anthropiques par rapport à leur niveau de 1990. Si cet objectif se réalise, le scénario « au fil de l'eau » promet de rendre la France « neutre » et probablement « puits net de carbone », pourvu qu'on le laisse se dérouler (les augmentations de récolte pour l'énergie actuellement prévues paraissent inconsidérées).
- ✓ Les augmentations de récolte prévues dans le cadre du Plan d'action national en faveur des énergies renouvelables et, au-delà de l'année 2020, dans celui de la Loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte (2015), conduisent, faute d'avoir été anticipées par des accroissements proportionnés de production biologique, à un affaiblissement considérable du puits de carbone forestier. Pour les décennies à venir, les hypothèses d'augmentation des prélèvements vont de 0,9 à $1,6\times10^6$ m^3/an^2 (volume bois fort tige), impliquant la décroissance de la biomasse forestière peu après 2050 dans le premier cas, dès le début des années 2030 dans le second, sous réserve encore que la production biologique se maintienne. Se pose donc la question de la compatibilité des objectifs actuels de récolte pour l'énergie avec la pérennité de la forêt, outre celle de son rôle de puits de carbone.
- ✓ Par différence entre l'empreinte carbone d'un scénario d'augmentation de prélèvement pour l'énergie et celle du scénario de référence « au fil de l'eau » on obtient l'empreinte carbone de l'augmentation de prélèvement (ou de récolte) pour l'énergie. Quelle que soit la période de temps considérée, cette empreinte carbone se révèle bien supérieure au contenu carbone du bois récolté. Comme ce bois a un facteur d'émission lui-même plus élevé que celui de tout autre combustible, l'idée d'une réduction d'émission par substitution énergétique apparaît vaine, même lorsqu'on prend en considération le rôle actif, dans la capture du carbone atmosphérique, du « gisement » forestier .

En bref, pour faire jouer à la forêt et à l'utilisation de son bois un rôle positif d'atténuation du changement climatique, il faudrait, partant de la situation présente, augmenter la production biologique par des actions de boisements, reboisements et d'amélioration générale des peuplements, restreindre les usages énergétiques du bois, privilégier les usages durables, et stocker dans des conditions propres à assurer leur conservation, les déchets ligneux, les produits bois en fin de vie et les bois impropres à toute utilisation. Toute augmentation de récolte devrait être accompagnée, sinon anticipée, par un accroissement de production adapté pour compenser les pertes ligneuses et non ligneuses liées à l'exploitation forestière et à l'emploi du bois récolté. Il peut être opportun, sauf nécessité, de réduire au contraire le volume de récolte pour favoriser le stockage en forêt, dans les arbres sur pied.

L'abandon progressif du bois énergie, l'encouragement à des usages durables des bois récoltés et les mesures sylvicoles visant à accroître le stock de carbone forestier comme moyen actif d'atténuation du changement climatique nécessitent des décisions politiques et des moyens financiers. Pour alimenter la réflexion en ce sens, il est bon de rappeler que c'est au nom de la « neutralité carbone » que le développement des usages énergétiques du bois a étéencouragé, jusqu'à présent, par des subventions ou des crédits d'impôts pour les particuliers, par l'exemption de la taxe carbone et des quotas d'émission pour les industriels. En bonne logique, étant admis que le combustible bois est « carboné » comme les autres, celui-ci devrait être soumis aux mêmes règles. En bonne logique aussi, étant donné qu'une réduction d'émission et une augmentation de capture sont équivalentes du point de vue climatique, la taxation des émissions carbonées devrait s'appliquer inversement à la capture, c'est-à-dire en tant que subvention au stockage de carbone dans les arbres sur pied ou dans les bois conservés.

Ainsi décrite, cette stratégie qui voudrait faire de la forêt un puits de carbone plutôt qu'une mine de charbon, ne peut que provoquer l'émoi des acteurs concernés, notamment forestiers. Il s'agit là d'un changement de paradigme qui soulève bien des questions de nature technique, économique, sociale écologique ou culturelle. Parmi les objections, en laissant de côté celles qui sont plus ou moins consciemment inspirées par le climato-scepticisme ou des préoccupations économiques opportunistes, il en est qui méritent considération :

- Le stockage, en forêt ou hors forêt, ne peut être indéfini.
- La forêt a besoin, pour croître, de soins culturaux générant quantité de produits ligneux qui ne trouveraient d'autre usage que celui de combustible.
- Sans récolte, l'évolution naturelle des forêts fait tendre celles-ci vers un état d'équilibre entre production biologique et mortalité : dans cette hypothèse, non seulement la forêt n'est plus productrice d'aucun bien, mais son rôle vis-à-vis de l'effet de serre finit par devenir nul.
- Le bois récolté est promis à décomposition et rendra de toute façon son carbone à l'atmosphère, qu'on le brûle ou non.
- Le stockage en forêt est soumis à aléas : incendies, tempêtes, épiphyties, effet du changement climatique même.
- Le stockage temporaire de carbone ne résout pas le problème, il ne fait qu'en reculer l'issue.
- etc...

Ces objections ne sont pas dénuées de sens mais doivent être nuancées et relativisées. En tout cas, elles doivent être jaugées hors du cadre conceptuel d'une « neutralité carbone » qui n'est que mythique : la menace climatique est imminente à l'échelle du temps forestier, l'idée de substitution énergétique repose sur des arguments contraires à la logique, les politiques énergétiques et forestières qui s'en inspirent sont contre-productives, et la forêt, qui joue déjà un rôle majeur dans la balance globale capture - émission de CO_2 n'attend que leur abandon pour offrir des moyens peut-être décisifs de lutte contre l'augmentation de l'effet de serre. Il est encore temps de changer le fusil d'épaule et de penser la forêt « autrement ».

Références bibliographiques

[Les références relatives aux sections V à IX sont listées à la fin des annexes A à D correspondantes]

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

ADEME (2014) Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie. Documentation des facteurs d'émission de la Base Carbone ®, version 11.0.0, 11 novembre 2014

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/*

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

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

Brack D (2017) Woody biomass for Power and Heat – Impacts on the Global Climate. The Royal Institute of International Affairs, Chatham House, London, February 2017

CGEDD (2013) Le facteur 4 en France : la division par 4 des émissions de gaz à effet de serre à l'horizon 2050. Conseil général de l'environnement et du développement durable. Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie. Rapport final n° 008378-01, Février 2013

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

FAO (2014) Agriculture, Forestry and Other Land Use Emissions by Sources and Removals by Sinks, 1990-2011 Analysis, FAO Statistics Division, ESS Working Paper No. 2, Mar 2014

FAO (2016) Forestry for a low-carbon future. Integrating forests and wood products in climate change strategies. FAO Forestry Paper 177, Rome 2016

Federici S, Tubiello F N, Salvatore M, Jacobs H, Schmidhuber J (2015) New estimates of CO2 forest emissions and removals: 1990–2015. Forest Ecology and Management 352 (2015) 89–98

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

Haberl H, Sprinz D, Bonazountas M, Cocco P, Desaubies Y, Henze M, Ole H, Johnson RK, Kastrup U, Laconte P, Lange E, Novak P, Paavola J, Reenberg A, van den Hove S, Vermeire T, Wadhams P, Searchinger T (2012) Correcting a fundamental error in greenhouse gas accounting related to bioenergy. Energ Pol 45C:18–23. doi:10.1016/j.enpol.2012.02.051

Houghton R A, House J I, Pongratz J, van der Werf G R, DeFries R S, Hansen M C, Le Quéré C, Ramankutty N (2012) Carbon emissions from land use and land-cover change. Biogeosciences, 9, 5125–5142, 2012

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

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

IPCC (1996b) Revised 1996 Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories – Reference manual – Chapter 5 Land-Use Change & Forestry, page 5-17, box 5

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 (2013) Hiraishi T, Krug T, Tanabe K, Srivastava N, Baasansuren J, Fukuda M and Troxler T G (eds) IPCC Revised Supplementary Methods and Good Practice Guidance Arising from the Kyoto Protocol. Published : IPCC, Switzerland, 2014

IPCC (2014a) Climate Change 2014 : Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland.

IPCC (2014b) 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

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

Le Quéré C, Andrew R M,, Canadell J G, Sitch S, Korsbakken J I, Peters G P, Manning A C, Boden T A, Tans P P, Houghton R A, Keeling R F, Alin S, Andrews O D, Anthoni P, Barbero L, Bopp L, Chevallier F, Chini L P, Ciais P, Currie K, Delire C, Doney S C, Friedlingstein P, Gkritzalis T, Harris I, Hauck J, Haverd V, Hoppema M, Goldewijk K K, Jain A K, Kato E, Körtzinger A, Landschützer P, Lefèvre N, Lenton A, Lienert S, Lombardozzi D, Melton J R, Metzl N, Millero F, Monteiro P M S, Munro D R, Nabel J E M S, Nakaoka S, O'Brien K, Olsen A, Omar A M, Ono T, Pierrot D, Poulter B, Rödenbeck C, Salisbury J, Schuster U, Schwinger J, Séférian R, Skjelvan I, Stocker B D, Sutton A J, Takahashi T, Tian H, Tilbrook B, van der Laan-Luijkx I T, van der Werf G R, Viovy N, Walker A P, Wiltshire A J, Zaehle S (2016) Global Carbon Budget 2016. Earth Syst. Sci. Data, 8, 605–649, 2016

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

Leturcq Ph (2014) Wood preservation (carbon sequestration) or wood burning (fossil-fuel substitution),which is better for mitigating climate change ? Annals of Forest Science, Volume 71, Issue 2, pp 117–124, March 2014

McKechnie J, Colombo S, Chen J, Mabee W, MacLean H L (2011) Forest Bioenergy or Forest Carbon ? Assessing Trade-Offs in Greenhouse Gas Mitigation with Wood-Based Fuels. Environ. Sci. Technol. 45, 789-795

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

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

Rabl A, Benoist A, Dron D, Peuportier B, Spadaro J V, Zoughaib A (2007) How to Account for CO_2 Emissions from Biomass in an LCA. Int J LCA 12 (5) 281

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

Schulze ED, Körner C, Law EB, Haberl H, Luyssaert S (2012) Large-scale bioenergy from additional harvest of forest biomass is neither sustainable nor greenhouse gas neutral. GCB Bioenergy, doi: 10.1111/j.1757-1707.2012.01169.x

Ter-Mikaelian MT, Colombo SJ, Chen J (2015) 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

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