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

ANNEXES

Décembre 2017

Mars 2018 (révisé)

ANNEXE A : Le bois est un combustible médiocre

... le meilleur reste à venir...

Dans tous les pays disposant d'une ressource forestière, les politiques publiques de l'énergie mettent l'accent sur l'utilisation du bois comme combustible en remplacement des énergies fossiles, pour le chauffage industriel et le chauffage urbain collectif, aussi bien que pour le chauffage individuel, et même pour la production d'électricité. Les raisons de cet engouement sont multiples, les principales étant, hors son bas coût, que la ressource ligneuse est « renouvelable » et que son usage énergétique serait « neutre » vis-à-vis de l'effet de serre. Ces arguments sont mal fondés mais, indéfiniment répercutés par les promoteurs du « bois énergie », ils finissent par être admis comme des vérités établies. Leur prégnance est telle que les propriétés du bois combustible, pourtant décrites depuis plus d'un siècle, sont aujourd'hui méconnues de la plupart des acteurs de terrain, du public et, ce qui est plus grave, des décideurs et de leurs conseillers. Ainsi la FAO (Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture) ne fait-elle référence, dans ses publications sur le bois combustible, ni au pouvoir calorifique, ni au facteur d'émission, caractéristiques pourtant essentielles (voir par exemple FAO 2010a ; FAO 2010b ; FAO 2013) . De même peut-on lire dans telle Directive du parlement européen et du Conseil que « *le facteur d'émission pour la biomasse est égal à zéro* » (EU 2003). De telles omissions ou contre-vérités se reproduisent sans nuances dans d'innombrables documents, dont, en France, ceux émanant de l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (voir par exemple les données relatives à la biomasse et au bois dans la « base carbone » ADEME 2016). Cette annexe est donc consacrée au nécessaire rappel des caractéristiques principales du combustible bois, dans l'ignorance desquelles on ne peut aborder valablement le sujet de l'impact climatique de son utilisation.

A-1 Composition centésimale du bois

Les principaux constituants du bois sont des matières organiques, cellulose, lignine, hémicelluloses, dont les structures et les proportions sont variables selon l'essence, la partie de l'arbre considérée (tronc, racines, branchages), l'âge et les conditions de croissance (climat, fertilité de la station), mais dont les compositions chimiques centésimales restent proches. Ainsi peut-on admettre pour le bois absolument sec (anhydre), avec une faible dispersion, la composition élémentaire suivante (Pettersen 1984) :

Carbone ≈ 50 % Hydrogène ≈ 6 % Oxygène ≈ 44 % Azote < 1 % Autres éléments < 1 %

Il en résulte que la combustion d'un kilogramme de bois anhydre libère dans l'atmosphère approximativement 0,5 kg de carbone, sous forme de dioxyde (CO_2) si la combustion est complète, soit une émission de 1,83 kg de CO_2. À l'inverse, la formation d'un kilogramme de bois par photosynthèse emprunte à l'atmosphère 1,83 kg de CO_2.

A-2 Pouvoir calorifique du bois anhydre

Le pouvoir calorifique, c'est-à-dire la quantité de chaleur dégagée par la combustion, dépend, pour le bois anhydre, de la prise en compte, ou non, de la chaleur latente de condensation de l'eau provenant de l'oxydation de l'hydrogène constitutif (cf., par exemple, Sawerysyn 1993, Sawerysyn 2012). Comme pour tous les combustibles, il convient donc de distinguer un pouvoir calorifique supérieur (PCS) qui ajoute à la chaleur sensible cette chaleur latente de condensation (c'est le PCS qu'on mesure dans une bombe calorimétrique) et un pouvoir calorifique inférieur (PCI) qui correspond à la seule chaleur sensible, lorsque l'eau est évacuée à l'état de vapeur en même temps que les autres produits gazeux de la combustion (c'est ce PCI qui caractérise donc la performance du bois énergie dans ses utilisations les plus courantes). La chaleur latente de condensation (ou de vaporisation) valant ≈ 2,26 mégajoules (MJ) par kilogramme d'eau à la pression atmosphérique et 100° C, et la combustion complète d'un kilogramme de bois anhydre (contenant 6 % en masse de H_2) produisant 0,540 kg de H_2O, la différence entre PCS et PCI est de ≈ 1,22 MJ /kg de bois anhydre dans ces conditions de température et de pression. Dans ce qui suit, on se référera principalement aux valeurs de PCI, la récupération de chaleur par condensation étant rarement utilisée avec le combustible bois.

Les valeurs de PCI et donc de PCS varient peu selon les essences. Toujours pour du bois anhydre, le PCI moyen est de 18,3 MJ/kg pour les feuillus et de 19,1 MJ/kg pour les résineux, avec une faible dispersion, au moins pour les bois français : écart maximum de 8 % pour les feuillus, 1 % pour les résineux (ADEME et al. 2001). Les essences feuillues et résineuses intervenant respectivement pour 2/3 et 1/3 dans le volume de bois sur pied, on se référera, dans ce qui suit, à la valeur moyenne pondérée de 18,5 MJ/kg pour le PCI des bois français anhydres. Cette valeur est, par ailleurs, communément admise pour les bois européens (JRC 2013).

A-3 Facteur d'émission intrinsèque

Le rapport au pouvoir calorifique de la masse de carbone (ou de CO_2) émise lors de la combustion définit le facteur d'émission (FE). Par rapport au PCI, le facteur d'émission du bois anhydre est donc sensiblement de 27 grammes de carbone par mégajoule (gC/MJ) ou 99 grammes de CO_2 par mégajoule (gCO_2/MJ). Le facteur d'émission défini par rapport au PCS est inférieur d'environ 6%. 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.

Dans les milieux s'intéressant au bois énergie, on peut préférer utiliser des unités non légales mais plus parlantes, telle la tonne-équivalent-pétrole (tep) dont la valeur convenue est 41,87 gigajoules. Le facteur d'émission du bois anhydre s'exprime alors par 1,13 tC/tep ou encore 4,14 tCO_2/tep.

A-4 Comparaison avec les principaux combustibles fossiles

Le tableau 1 récapitule les pouvoirs calorifiques inférieurs et les facteurs d'émission de CO_2 pour les principales catégories de combustibles en usage, selon diverses sources : Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME 2016), Joint Research Center of the European Commission (JRC 2013), International Panel on Climate Change (IPCC 2006). Il ne s'agit que de valeurs-types (valeurs recommandées « par défaut » pour les déclarations environnementales d'émission de gaz à effet de serre notamment) dont la variabilité est principalement liée à celle de la composition des combustibles selon leur provenance et à l'étendue géographique considérée pour le calcul des moyennes (France, Europe, Monde).

Combustible	ADEME (2016)		JRC (2013)		IPCC (2006)	
	PCI MJ/kg	FE gCO_2/MJ	PCI MJ/kg	FE gCO_2/MJ	PCI MJ/kg	FE gCO_2/MJ
Bois	18	0[(2)]	18,5	99,1	15,6	112
Lignite	17	100	-	-	11,9	101
Charbon[(1)]	26,7	98,3	26,5	96	26,7	98,3
Pétrole brut	42	73	42	75,5	42,3	73,3
Gaz naturel	49,6	55,8	45,1	56,2	48	56,1

(1) anthracite (2) sous prétexte de « neutralité carbone »

Tableau 1 - Valeurs-types du pouvoir calorifique inférieur (PCI) et du facteur d'émission de CO_2 (FE) pour les principaux combustibles en usage (anhydres) selon différentes sources

Ce tableau montre que par ses caractéristiques intrinsèques, le bois, même anhydre, n'est pas un bon combustible : son PCI est plus faible que celui des combustibles fossiles en usage et son facteur d'émission est plus élevé, lignite peut-être excepté.

A-5 PCI et facteur d'émission du bois en fonction de son humidité

En pratique, le pouvoir calorifique inférieur et le facteur d'émission du bois dépendent de l'humidité dont le taux « sur brut » H % (rapport de la masse d'eau à la masse totale) peut varier couramment de 10, 20 ou 30 % (bois séché à l'air) à 60 % ou davantage (bois vert, fraîchement coupé). Une partie de l'énergie libérée lors de la combustion, d'autant plus grande que le bois est plus humide, est alors consacrée à évaporer la masse d'eau contenue dans le bois. Le PCI décroît ainsi linéairement en fonction du taux d'humidité.

La chaleur de vaporisation de l'eau à partir de 0° C étant de 2,67 MJ/kg (chaleur nécessaire pour amener l'eau à 100° C augmentée de la chaleur latente de vaporisation), il est facile de calculer que le PCI « brut » est réduit, par rapport au PCI « anhydre », de 1,14 % par pour-cent d'humidité et s'annule donc théoriquement pour un taux d'humidité « sur brut » de 87 %. L'impact sur la variation du facteur d'émission est atténué pour les bois peu humides car le contenu carbone de l'unité de masse de bois décroît lui aussi linéairement avec le taux d'humidité ; par contre, pour les bois très humides, le facteur d'émission augmente considérablement et tend vers l'infini lorsque le PCI approche de la valeur zéro. La figure 1 représente les variations du PCI et du facteur d'émission en fonction du taux d'humidité : pour du bois réputé « sec », séché à l'air, dont le taux H % peut varier de 10 % (cas type des « pellets », granulés de sciure comprimée) à 20 % (bûches, par exemple) ou

même 30 % (plaquettes forestières), le pouvoir calorifique type est réduit de 11,4 % à 22,9 % ou même 34,3 %, respectivement, par rapport à celui du bois anhydre et le facteur d'émission se trouve modérément augmenté de 1,6 %, 3,7 % ou 6,5 %. Pour 60 % d'humidité (bois vert), le PCI n'est plus que de 5,8 MJ/kg et le facteur d'émission s'élève à 126,5 gCO_2/MJ.

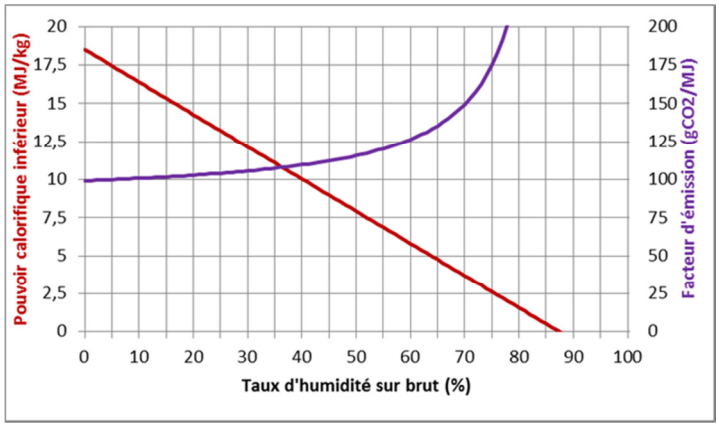


Figure 1 - Variations du pouvoir calorifique inférieur et du facteur d'émission du bois en fonction de son taux d'humidité

A-6 Émissions « amont » et émissions de combustion autres que le CO_2

Seules les caractéristiques intrinsèques des combustibles, c'est-à-dire celles qui se manifestent lors d'une combustion complète, ont été prises en compte jusqu'ici. Pour préciser l'empreinte carbone de l'unité de chaleur produite, encore faut-il prendre en considération l'énergie dépensée et les gaz à effet de serre émis « en amont » pour l'exploitation, le transport, la transformation, le conditionnement et 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. La multiplicité des étapes et traitements possibles pour le combustible entre sa source et son point d'utilisation et la diversité des conditions de combustion rendent incertaines des estimations globales de ces émissions.

Combustibles	Émissions directes de CO_2 (gCO_2/MJ)	Autres émissions de combustion (gCO_2eq/MJ)	Émissions « amont » (gCO_2eq/MJ)	Total des émissions (gCO_2eq/MJ)
Bois (H 20%)	102,8	5,2	3	111
Lignite	100	1,25	9	110,25
Charbon(1)	98,3	0,4	9	107,7
Pétrole brut	73	0,25	6,5	79,75
Gaz naturel	55,8	0,8	10,8	67,4

(1) anthracite

Tableau 2 - Émissions directes de CO2, autres émissions de combustion et émissions « amont »
Les données sont empruntées à la « Base Carbone » de l'ADEME (2016) sauf pour l'émission directe de CO_2 du bois. Pour celle-ci, on a retenu la valeur du facteur d'émission établie plus haut pour un taux d'humidité de 20 % (valeur-type pour le bois séché à l'air)

Quelques ordres de grandeur indiqués dans le tableau 2 d'après des données de l'ADEME (2016) montrent cependant que le cumul des émissions « amont » et des émissions de combustion autres que le dioxyde de carbone, essentiellement méthane (CH_4) et oxyde nitreux (N_2O), ne représente au total, en équivalent CO_2 (CO_2eq), qu'environ 10 % de l'émission principale (20 % pour le gaz naturel), ce qui ne modifie pas le classement des différents combustibles établi selon le facteur d'émission intrinsèque.

A-7 Facteur d'émission « apparent »

Dans le tableau 2, l'évaluation des émissions « amont » du bois omet celles qui sont liées aux « pertes » d'exploitation. 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 de 25% 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 des 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, sans même compter les émissions « amont », est augmenté d'autant par rapport au facteur d'émission intrinsèque. Aussi, est-ce un total d'émission d'au moins 150 gCO_2/MJ qui devrait apparaître pour le bois (plus de 160 gCO_{2eq}/MJ en prenant en compte les émissions « amont » et l'émission de combustion excédentaire), valeur considérablement plus élevée que pour tout autre combustible. On peut remarquer, à ce propos, que dans le cas du gaz naturel, les pertes de méthane lors de l'exploitation, du transport ou du stockage sont bien prises en compte dans le tableau 2, ce qui explique la valeur comparativement élevée des émissions « amont » affichées. Il y a donc lacune, sur ce point, dans le cas du bois.

Cependant, les « pertes » existent aussi lorsque le bois récolté est destiné, en tout ou en partie, à d'autres emplois que celui de combustible. Il est donc préférable d'imputer à la récolte même le surcroît d'émission causé par ces pertes, et d'évaluer l'impact de la seule combustion du bois par comparaison à la conservation de ce bois pour d'autres usages (annexe B). Il n'en reste pas moins que dans l'empreinte carbone globale du bois énergie, il convient d'inclure l'ensemble des émissions, consécutives à la récolte, dont la décomposition des « pertes » ne constitue qu'une part : selon les conditions de récolte, la litière et le sol minéral sont aussi à la source d'évasions de carbone et la production biologique nette de la forêt, c'est-à-dire le flux net de carbone capturé dans l'atmosphère par lequel se constitue la biomasse forestière, est directement affectée. Comme ces émissions ne sont pas synchrones des récoltes mais étalées dans le temps, l'empreinte carbone, définie comme la masse nette de carbone échangée avec l'atmosphère, dépend de la période de temps considérée. La notion de facteur d'émission perd alors de sa pertinence (annexe D).

A-8 Autres inconvénients du combustible bois

Le faible pouvoir calorifique et la valeur élevée du facteur d'émission ne sont pas les seuls inconvénients de l'usage du bois comme combustible. L'objet de cette étude étant principalement

d'analyser l'impact « effet de serre » de la gestion forestière et des utilisations de la matière ligneuse produite, on ne fera que citer pour mémoire quelques autres désavantages marquants :

- Les foyers consommant du bois ont des rendements souvent inférieurs à ceux alimentés par les combustibles fossiles. Si on excepte les chaudières modernes utilisant des granulés de bois (pellets) ou des plaquettes forestières, dont le rendement peut atteindre 80 à 90 %, comparable donc au rendement des chaudières à gaz ou à fioul, le parc des appareils de chauffage domestique à bois est encore majoritairement constitué de foyers ouverts (cheminées traditionnelles, rendements de 10 à 25 %), de foyers fermés (poêles et inserts, rendements de 30 à 70 %) et de chaudières à bûches (rendement de 55 à 75 %). Il en résulte que, pour une même quantité de chaleur utile, la consommation de combustible et l'émission de CO_2 peuvent être considérablement plus élevées que ce que permettent de prévoir les valeurs intrinsèques du pouvoir calorifique et du facteur d'émission du bois ; le facteur multiplicatif peut atteindre quatre à dix dans le cas le plus défavorable des foyers ouverts.

- La faible valeur du pouvoir calorifique du bois implique que, pour une même quantité de chaleur libérée, la masse de bois requise est supérieure à celle des combustibles concurrents (lignite excepté, cf. tableau 1). Par ailleurs, la densité du bois anhydre est relativement faible, 0,55 en moyenne statistique pour les feuillus, 0,44 pour les résineux, soit 0,51 en moyenne pondérée pour les bois français, les essences feuillues et résineuses intervenant respectivement pour environ 2/3 et 1/3 dans le volume de bois sur pied (cf. annexe C). Enfin, le bois, qu'il soit brut ou fragmenté, voit son volume par unité de masse affecté d'un coefficient de foisonnement variable selon le conditionnement : un volume réel de bois (mètre-cube) occupe un volume apparent (stère ou mètre-cube apparent) d'autant plus élevé que les bûches ou billons sont plus longs, flexueux et de plus petit diamètre ou que le bois est davantage divisé. Ainsi, un mètre-cube réel de billons occupe de l'ordre de 1,3 à 1,6 stère pour une longueur d'un mètre, et de 1,4 à 2 stères pour une longueur de deux mètres (FCBA 2015). De même, un mètre-cube réel de bois fournit, par déchiquetage, environ trois mètres-cubes apparents de plaquettes forestières (trois « map »). Par rapport aux autres combustibles solides, liquides ou gazeux, l'usage du bois soulève donc des difficultés particulières de manutention, de transport et d'entreposage. Par exemple, pour une tonne-équivalent-pétrole d'énergie calorifique (41,87 GJ), il faut disposer de 2,95 tonnes de bûches (humidité 20 %, PCI ≈ 14,27 MJ/kg) ou de 3,45 tonnes de plaquettes forestières (humidité 30%, PCI ≈ 12,15 MJ/kg) correspondant à des volumes réels moyens respectifs d'environ 4,6 mètres cubes (densité ≈ 0,64 pour un taux d'humidité de 20 %) ou 4,7 mètres cubes (densité ≈ 0,73 pour un taux d'humidité de 30 %) soit de l'ordre de 6 à 7,4 stères pour des bûches issues de billons de un mètre de longueur et plus de 14 mètres cubes de plaquettes forestières (14 map). Ces chiffres n'ont qu'une valeur statistique et varient largement, cas par cas, selon l'essence utilisée (ou le mélange d'essences) en relation principalement avec la densité des bois (de ≈ 0,35 à ≈ 1 aussi bien pour les bois résineux que pour les bois feuillus). Par comparaison, pour une tonne-équivalent-pétrole d'énergie rendue, la masse nécessaire de charbon serait d'environ 1,6 tonne (anthracite) pour un volume non compacté de l'ordre de 2 mètres cubes ; dans le cas du fioul, le volume occupé ne serait que de 1,25 mètre cube.

- La combustion du bois émet, outre des gaz à effets de serre, de nombreuses substances toxiques ou cancérigènes : monoxyde de carbone, dioxyde de soufre, oxydes d'azote, composés organiques volatils, dioxine, hydrocarbures aromatiques polycycliques, ainsi que des particules

fines, en quantités et proportions qui sont liées notamment à la conception du foyer (rendement, température de combustion...) et à la qualité du combustible (taux d'humidité, fragmentation, ...). Les foyers ouverts et les poêles et inserts de faible rendement sont les plus polluants, au point de poser en certaines régions de réels problèmes de santé publique (cf. par exemple ORAMIP 2016) . Ainsi, d'après les données de l'inventaire des émissions de polluants et GES du CITEPA (2015) et différentes analyses (ADEME 2013, Vernois et Deglise 2015, Herbelot 2016), le bois énergie qui représente moins de 4 % de la consommation française d'énergie primaire (SOeS 2016), intervient pour près de 30 %, 40 % et 60 % respectivement dans les émissions nationales de particules PM_{10}, $PM_{2,5}$, et $PM_{1,0}$, pour environ 20% dans les émissions de composés organiques volatils et 65% dans celles des hydrocarbures aromatiques polycycliques, soit davantage , pour ces polluants, que les contributions des transports, de l'industrie manufacturière ou de l'agriculture. La modernisation du parc des appareils de chauffage s'impose donc en tout premier lieu, mais on ne peut résoudre totalement le problème sans recours systématique à des filtres catalytiques et d'électrofiltres, ce qui ferait perdre au bois énergie, pour les utilisateurs domestiques, beaucoup de son attractivité économique.

A-9 Conclusion

Par les valeurs de son PCI et de son facteur d'émission de CO_2, et aussi par sa combustion polluante, le bois dispute au lignite la dernière place, derrière le charbon, dans le classement de valeur des combustibles carbonés. Si la pollution de l'air peut être réduite dans l'avenir par le renouvellement du parc des appareils de chauffage au bois et par des progrès techniques dans la conception des foyers, restent les handicaps d'un faible pouvoir calorifique et d'un facteur d'émission élevé. L'affirmation de ce que le combustible est renouvelable et neutre vis-à-vis de l'effet de serre a longtemps permis de mettre sous le boisseau les dures réalités physiques et de continuer de promouvoir, envers et contre tout, le bois énergie. Mais, il y a malentendu : ces deux arguments, caractère renouvelable de la ressource et neutralité carbone, même dans les hypothétiques cas où ils seraient admissibles, ne justifient en rien le remplacement par le bois des combustibles fossiles, ainsi que cela est démontré dans le présent document (cf. texte principal et les annexes B et D). Nul ne peut nier que lorsqu'on brûle du bois, on renvoie dans l'atmosphère son contenu carbone sous forme de CO_2. En substituant du bois à un combustible fossile, on remplace donc 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 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 : l'objectif étant d'atténuer le changement climatique, il faut laisser la forêt continuer de 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).

Références bibliographiques

ADEME, CrittBois, Fibois, CTBA (2001) Mesure des caractéristiques des combustibles bois, juillet 2001

ADEME (2013) Bois énergie et qualité de l'air, octobre 2013

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/*

CITEPA (2015) Inventaire des émissions de polluants atmosphériques et de gaz à effet de serre en France – Format SECTEN © CITEPA 2015

EU (2003) Directive 2003/87/CE du Parlement européen et du Conseil du 13 octobre 2003 établissant un système d'échange de quotas d'émission de gaz à effet de serre dans la Communauté, Journal officiel de l'Union européenne, 25.10.2003, Annexe IV, page L 275/44

FAO (2010a) Criteria and indicators for sustainable woodfuels. FAO Forestry paper 160. Food and agriculture organization of the United Nations, Rome 2010

FAO (2010b) What woodfuels can do to mitigate climate change. FAO Forestry paper 162. Food and agriculture organization of the United Nations, Rome 2010

FAO (2013) Climate change guidelines for forest managers. FAO Forestry paper 172. Food and agriculture organization of the United Nations, Rome 2013

FCBA (2015) Memento 2015

Herbelot N (2016) Les actions des collectivités territoriales pour réduire les niveaux de pollution atmosphérique : retours d'expérience. Saint-Maurice, 21 juin 2016

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

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

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

ORAMIP (2016) Caractérisation chimique des particules en trois sites de Midi-Pyrénées. Atmo Midi-Pyrénées – ORAMIP, janvier 2016

Sawerysyn JP (1993) Les pouvoirs calorifiques. Bulletin de l'union des physiciens, vol. 87, n°752, pp. 401-411, mars 1993

Sawerysyn JP (2012) La combustion du bois et ses impacts sur la qualité de l'air. Air Pur, n°81, 2012

SOeS (2016) Chiffres clés de l'énergie, édition 2015. Service de l'observation et des statistiques du Commissariat général au développement durable. Février 2016

Vernois M et Deglise X (2015) La combustion du bois contribue-t-elle à la pollution de l'air ? Académie d'agriculture de France, section 2 : Forêts et filière bois, décembre 2015

ANNEXE B : Comptabilité carbone de l'utilisation du bois comme combustible

« ... il n'y a rien de plus fastidieux, rien de plus difficile que de vouloir démontrer l'évidence »
(Adolphe Thiers)

L'empreinte « carbone » de l'utilisation d'un combustible s'obtient généralement en ajoutant à l'émission directe de combustion – égale en principe au contenu carbone – l'ensemble des émissions annexes, dites « amont », liées aux opérations d'extraction, de transport, de raffinage, de conditionnement et de mise à disposition. Pour le bois, contrairement aux combustibles fossiles, le gisement (la forêt) est actif, empruntant à l'atmosphère du carbone pour constituer la biomasse et les variations du stock de carbone dans ce gisement doivent être prises en compte : le « système à étudier », au sens admis dans les analyses de cycle de vie, englobe ainsi la forêt elle-même et le bois que l'on en extrait.

Mais la biomasse ligneuse peut être employée autrement que comme combustible et, au-delà d'une simple comptabilité carbone, la question posée est celle de la meilleure manière de gérer la forêt et d'utiliser son bois pour lutter contre l'augmentation de l'effet de serre. Aussi doit-on évaluer non seulement l'empreinte carbone du « bois énergie », mais encore les bilans de substitution réciproques du bois et des autres sources de chaleur. Le système à étudier englobe alors la source concurrente, outre la forêt et le bois qu'on en extrait. C'est à la comparaison, de ce point de vue, du bois énergie et des principaux combustibles fossiles (charbon, pétrole, gaz) qu'on s'intéresse ici, étant entendu que la solution idéale serait de ne recourir qu'à des sources d'énergie « sans carbone » (nucléaire, photovoltaïque, éolienne, marine, géothermique...). Cette annexe récapitule les éléments méthodologiques d'une telle comparaison : on rejette l'assertion de « neutralité carbone de la combustion du bois dans le cadre d'une gestion durable de la forêt » sur laquelle s'appuient la plupart des écrits en faveur du bois énergie et on envisage, comme alternative évidente à la combustion du bois, sa non-combustion, c'est-à-dire sa préservation en l'état ou sa conservation pour d'autres usages, avec un objectif de capture et de séquestration de carbone atmosphérique.

Le vocabulaire utilisé pour traiter de la question controversée des bioénergies étant encore sujet à variations selon la spécialité des auteurs (énergéticiens, forestiers, environnementalistes...), il est nécessaire de préciser l'acception de certains termes dans le présent contexte :

- Par « système étudié » on entend ici, schématiquement, un ensemble forestier, le bois récolté, le combustible fossile mis en regard pour une même énergie libérée par combustion, ou seulement un ou deux de ces éléments. Les variables du système sont les stocks de carbone (ou les contenus carbone) et les flux de carbone échangés avec l'atmosphère (capture et émission).

- Lorsque la capture de carbone l'emporte sur l'émission, le système est désigné comme « puits ». Il est « source » dans le cas contraire. Puits et source sont quantifiés par la différence (balance) des flux de capture et d'émission, généralement définis sur une base annuelle. Pour une raison qui apparaîtra plus loin, on adopte la convention de signe positif pour la capture de carbone, l'émission étant comptée négativement ; un « puits » est positif, une « source » est négative.

- L'empreinte carbone (« *carbon footprint* ») est la balance capture-émission du système étudié intégrée sur une période de temps donnée. Une empreinte carbone est donc positive ou négative selon que, sur la période considérée, la capture l'a globalement emporté sur l'émission ou l'inverse.

- Le bilan de substitution d'un système A à un système B est la différence [A – B] des empreintes carbone respectives des deux systèmes, calculées pour une même quantité d'énergie libérée et une même période de temps.

Enfin, pour alléger l'exposé on admettra les simplifications suivantes :

- Le contenu carbone du bois anhydre est sensiblement de 50 % en masse quelle que soit l'essence considérée.

- La durée usuelle de séchage des bois avant utilisation comme combustible est généralement courte comparée aux temps caractéristiques de la dynamique forestière : confondre l'année de récolte et celle de combustion n'a que peu d'incidence sur la valeur de l'empreinte carbone.

- Le bois est un matériau durable : il n'y a pas d'obstacle à sa conservation sur un long terme si on le préserve de l'humidité et des insectes xylophages. Par « long terme », on entend une durée compatible avec les échéances climatiques auxquelles se trouve confrontée l'humanité, soit le siècle ou même davantage. On négligera par conséquent, dans la comptabilité simplifiée ci-après, l'émission de carbone liée à la décomposition des bois conservés à l'état brut ou transformé. Cette approximation peut être évitée (cf. par exemple Leturcq 2014) au prix d'une nette complication mathématique qui serait sans utilité pour la compréhension des arguments exposés dans ce document.

B-1 Empreinte carbone du système [forêt + bois]

Les évaluations courantes de l'impact climatique de la gestion forestière et de l'utilisation du bois récolté, notamment en ce qui touche à la production d'énergie, mettent en avant un argument de « neutralité carbone des usages énergétiques de la biomasse » pour lequel on ne trouve aucune justification sérieuse dans la littérature scientifique, mais qui est néanmoins admis par le plus grand nombre comme postulat. Par là, les tenants des bioénergies soutiennent que la substitution de biomasse – de bois notamment – aux combustibles fossiles « évite » l'émission de combustion de ces derniers et aurait donc un impact favorable vis-à-vis de l'effet de serre. Cela ne se peut puisque le facteur d'émission du bois est plus élevé que celui de tout autre combustible (cf. annexe A). Mais encore, la « neutralité carbone » contrevient à deux principes physiques intangibles :

a) Comme conséquence de la conservation de la masse, l'empreinte d'un système qui n'a d'échanges de carbone qu'avec l'atmosphère s'identifie à la variation de la masse de carbone contenue dans le système. Les masses de carbone, dans la forêt et dans le bois récolté, sont essentiellement variables, et l'empreinte carbone ne peut être nulle, sauf cas particulier.

b) 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.

Aussi ne faut-il pas s'étonner de ce que le respect de ces principes conduise à des conclusions opposées à celles qui découlent de l'assertion de « neutralité carbone » du bois énergie, ainsi que cela est démontré ci-après.

B-1-1 Stock et flux de carbone dans une forêt exploitée pour l'énergie

La figure 1 propose un modèle simple pour un ensemble forestier quelconque exploité pour l'énergie. Sont représentés les flux de carbone échangés entre l'atmosphère d'une part, la forêt et l'utilisation de son bois comme combustible d'autre part.

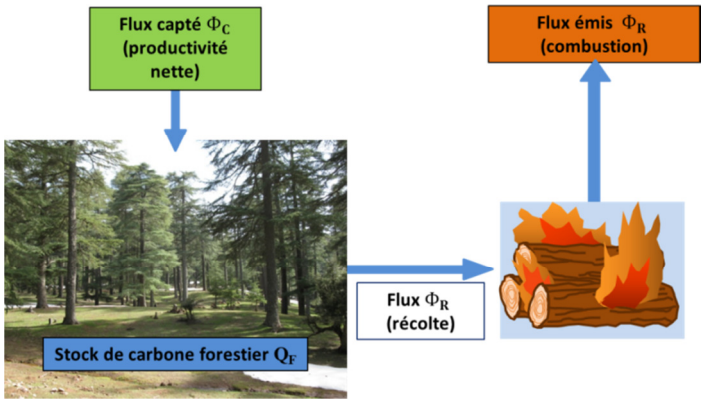


Figure 1 - Stock et flux de carbone dans une forêt exploitée pour l'énergie

Le flux net de carbone Φ_C capturé dans l'atmosphère est celui par lequel se constitue la biomasse forestière, principalement ligneuse. Il correspond à la productivité nette de l'écosystème, c'est-à-dire à la différence entre le flux brut de carbone capté par photosynthèse et le flux de carbone rendu à l'atmosphère par la respiration de la végétation et 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 sous-sol. À la récolte de bois à usage quasi immédiat de combustible, correspond un flux de carbone Φ_R qui est aussi celui rendu à l'atmosphère sous forme de dioxyde (CO_2) par la combustion. Le stock de carbone forestier Q_F, somme des stocks contenus dans les différents compartiments énumérés ci-dessus, intègre la différence des flux Φ_C et Φ_R.

Les flux Φ_C et Φ_R sont définis, en matière forestière, sur un « pas de temps » Δt d'une année et représentent alors des masses de carbone annuellement captée pour Φ_C, annuellement extraite de la forêt pour Φ_R. Par ailleurs, les valeurs pertinentes du stock Q_F sont celles observées en fin de saison de végétation. En affectant l'indice i aux symboles des différentes variables pour l'année i et en désignant par ΔQ_{Fi} la variation du stock de carbone forestier Q_F entre le terme de l'année i et celui de l'année précédente $i-1$, on peut écrire :

$$\Delta Q_{Fi} = Q_{Fi} - Q_{Fi-1} = (\Phi_{Ci} - \Phi_{Ri})\Delta t \qquad (\Delta t = 1 \text{ an}) \qquad (1)$$

Par cette simple équation de continuité, la variation du stock ΔQ_{Fi} apparaît comme une mesure de l'échange global annuel de carbone avec l'atmosphère, abstraction faite des émissions amont liées à la sylviculture, à l'exploitation des bois, leur transport, leur conditionnement et aux autres émissions annexes.

Si le flux émis par combustion Φ_{Ri} est inférieur au flux net capté Φ_{Ci}, ΔQ_{Fi} est positif, le stock de carbone forestier s'accroît : le système [forêt + bois énergie] se comporte, pour l'année i, en puits de carbone vis-à-vis de l'atmosphère (capture, absorption). À l'inverse, si Φ_{Ri} est plus grand que Φ_{Ci}, le stock de carbone forestier décroît : le système [forêt + bois énergie] se comporte en source de carbone (émission). **Il n'y a « neutralité » des usages énergétiques du bois pour l'année i que si on a strictement $\Phi_{Ri} = \Phi_{Ci}$ ($\Delta Q_{Fi} = 0$), si donc le stock de carbone forestier est constant**.

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. Par ailleurs, faire figurer le pas de temps Δt d'un an dans les écritures répond au souci de préserver leur homogénéité (variation de stock = produit d'un flux par un intervalle de temps).

De la réflexion tout à fait élémentaire qui précède, découlent les remarques suivantes :

- La « neutralité carbone », entendue comme un équilibre de la balance capture-émission, n'est pas une propriété intrinsèque du bois, mais le résultat d'une gestion forestière à stock de carbone Q_F maintenu constant. L'erreur fréquente des politiques de soutien au bois énergie est de prendre pour hypothèse de travail générale ce qui est conclusion pour un cas particulier.

- Le concept de neutralité carbone, qui s'inscrit dans une vision statique de la forêt et des usages énergétiques de son bois, n'a plus de sens quand le stock varie. Ainsi, partant d'une situation hypothétique de neutralité :

$$\Phi_{Ri-1} = \Phi_{Ci-1} \qquad \Delta Q_{Fi-1} = 0 \ , \qquad (2)$$

une augmentation de la récolte, c'est-à-dire une augmentation $\Delta\Phi_{Ri}$ du flux Φ_R, implique, d'après l'équation (1) avec $\Phi_{Ri} = \Phi_{Ri-1} + \Delta\Phi_{Ri}$ et toutes choses étant supposées rester égales par ailleurs, dont la productivité nette ($\Phi_{Ci} = \Phi_{Ci-1}$), une diminution de même amplitude du stock, ce qui équivaut à une émission de carbone de valeur :

$$\Delta Q_{Fi} = -(\Delta\Phi_{Ri})\,\Delta t \qquad (\Delta t = 1 \text{ an}) \qquad (3)$$

En conséquence, l'argument de neutralité ne peut être avancé pour justifier les politiques promouvant le bois énergie sans faire en sorte que la productivité **nette** Φ_C s'accroisse, de manière

synchrone, à l'égal de la demande Φ_R pour maintenir le stock constant ; en clair, l'amélioration de la productivité forestière et/ou l'extension des surfaces productives devraient accompagner, sinon précéder, l'augmentation de la demande de bois énergie. Ce point de vue est celui, notamment, du Comité scientifique de l'Agence Européenne pour l'Environnement (E.E.A. 2011) et de plusieurs auteurs dont H. Haberl et coll. (2012).

Hormis une telle adaptation de la production biologique nette et de la demande, la situation de « neutralité » ne peut être qu'un cas d'école. Les systèmes [forêt + bois énergie] que l'on peut considérer, à l'échelle d'une parcelle boisée, d'un massif forestier, de plusieurs massifs, de toutes les forêts de France ou de celles du monde entier se comportent en source ou en puits de carbone vis-à-vis de l'atmosphère. Pourtant, les partisans du bois énergie, s'ils admettent que le premier cas est défavorable du point de vue de l'impact climatique, considèrent paradoxalement que la « neutralité » est maintenue dans le second, ce qui autoriserait l'augmentation des prélèvements. Deux exemples, entre mille :

> « A forest producing carbon neutral wood will have stable or increasing stocks of forest carbon » ("Recommendations on Biomass Carbon Neutrality", World Business Council for Sustainable Development, January 2015)
>
> « Biomass used to generate energy should be treated as carbon neutral where the growth rate of forests is greater than or equal to harvest levels » ("Carbon Neutrality of Biomass", American Forest &Paper Association, January 2015)

Or, que la situation initiale soit celle de source ou de puits, le raisonnement conduisant à l'expression (3) s'applique de la même manière : si la productivité nette reste inchangée, une variation $\Delta\Phi_{Ri}$ du flux Φ_R se répercute entièrement, changée de signe, sur la variation annuelle du stock de carbone forestier :

$$\Delta Q_{Fi} = \Delta Q_{Fi-1} - (\Delta\Phi_{Ri})\,\Delta t \qquad (\Delta t = 1 \text{ an}) \qquad (4)$$

À productivité nette constante, toute augmentation de récolte de bois pour l'énergie doit ainsi être logiquement considérée comme surimposant une « émission ». A l'inverse, une diminution de la récolte équivaut à une « capture ».

La nécessité d'une comptabilité « carbone » précise pour le système [forêt + bois énergie] ne saurait donc être occultée par une hypothèse de « neutralité » qui est infondée, sauf cas particulier, et cette comptabilité carbone doit être établie à partir des variations du stock de carbone ligneux. C'est ce que prévoient d'ailleurs les règles édictées par le GIEC/IPCC pour établir les bilans nationaux d'émission de gaz à effet de serre (IPCC 1996, IPCC 2006), règles rappelées en Europe comme devant être d'application générale par décision du Parlement européen et du Conseil (EU 2013). Paradoxalement, des traités internationaux et de nombreux textes réglementaires ou législatifs, relatifs à la mise en œuvre de politiques forestières ou énergétiques ayant comme objectif la modération du changement climatique, font référence à la « neutralité carbone des usages énergétiques de la biomasse ». Et bien des acteurs de terrain, forestiers, industriels et commerçants de la filière bois, élus, ainsi que nombre de responsables et cadres d'administrations et agences publiques... restent convaincus, à tort, du bien-fondé de ce qui n'est qu'une assertion, malgré de nombreuses mises en garde provenant de milieux scientifiques (Searchinger et coll. 2009; Johnson

2009 ; Leturcq 2011 ; McKechnie 2011; Haberl et coll. 2012; Schulze et coll. 2012 ; M.T. Ter-Mikaelian et coll. 2015a, Brack 2017, etc...).

B-1-2 Comptabilité carbone pour le système [forêt + bois énergie]

La solution de l'équation (1), obtenue par simple itération, décrit l'évolution du stock de carbone forestier. On a, pour l'année n :

$$Q_{Fn} - Q_{F0} = \sum_{i=1}^{n} (\Phi_{Ci} - \Phi_{Ri})\Delta t \qquad (5)$$

où Q_{F0} est le stock existant à la fin de l'année origine (0). Cette expression établit, pour une période $0 \rightarrow n$ quelconque, l'équivalence de l'empreinte carbone « intrinsèque » du système [forêt + bois énergie] (deuxième membre) et de la masse de carbone nette captée ou émise (premier membre). Cette empreinte varie selon la période de temps considérée, dépendant des évolutions de la productivité nette (Φ_{Ci}) et de la récolte (Φ_{Ri}). L'expression (5) est formelle : l'évolution de la productivité biologique nette, notamment en ce qui concerne sa dépendance vis-à-vis des récoltes antérieures à l'année i, reste à expliciter cas par cas (cf. annexe D).

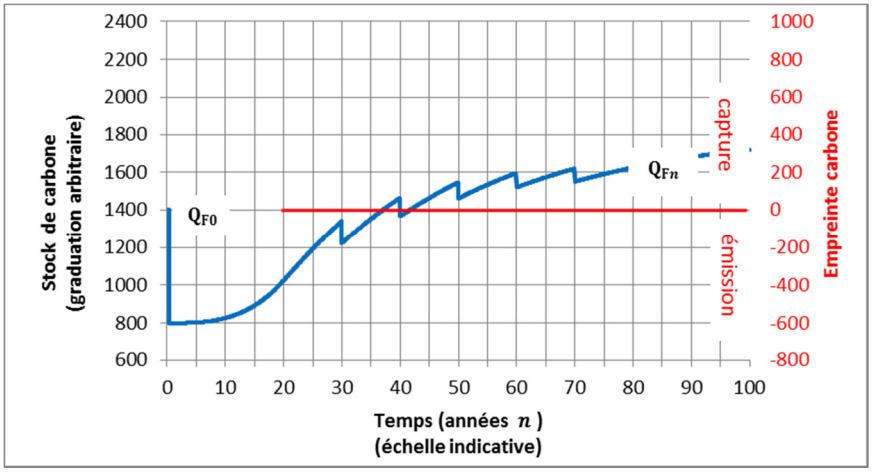


Figure 2 - Équivalence entre empreinte carbone intrinsèque (échelle à droite du graphique) et variation du stock de carbone (échelle de gauche)

[Parcelle forestière replantée après coupe rase ; produits de la coupe et des éclaircies destinés à l'énergie]

La figure 2 illustre l'équivalence, sur une période de temps quelconque, entre empreinte carbone et variation du stock de carbone. On considère le cas simple d'une parcelle forestière replantée après coupe rase, les produits de la coupe et des éclaircies du nouveau peuplement étant destinés à l'énergie. Il s'agit, par exemple, d'un mauvais taillis remplacé par un boisement d'une essence noble avec un objectif lointain de production de bois d'œuvre. La courbe figurée est une représentation continue, lissée pour plus de clarté, de la variation du stock de carbone forestier. Cette variation 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 (Φ_{Ri}). D'après l'expression (5), l'évolution de l'empreinte carbone du système [forêt + bois énergie] est calquée sur la variation du stock de carbone forestier Q_{Fn} et peut donc être

représentée par la même courbe avec un décalage d'échelle d'ordonnée d'amplitude Q_{F0}. Dans la figure 2, on se rapporte par conséquent à l'échelle de gauche pour lire les variations de stock de carbone et à l'échelle de droite pour la lecture de l'empreinte carbone. Dans le cas présent, 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).

Pour une évaluation complète de l'empreinte, il faut tenir compte des émissions de gaz à effet de serre qui sont liées aux opérations de sylviculture, à l'exploitation forestière, au transport des bois, à leur conditionnement sous forme de bûches, plaquettes ou granulés et à la mise à disposition au lieu d'utilisation. 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. Il est commode d'ajouter cet excès d'émission à l'émission amont, étant entendu que l'émission de combustion théorique est prise en compte à travers les variations (5) du stock de carbone forestier. Il est alors préférable de parler d'émissions « extrinsèques » incluant les émissions « amont ». Le total de ces émissions extrinsèques peut être considéré comme proportionnel à la masse des bois exploités et donc à leur contenu carbone. En désignant par β_b le coefficient de la proportionnalité, l'empreinte carbone cumulée $E^{be}_{0\to n}$ du système (exposant ^{be} pour « bois énergie ») entre l'année choisie pour origine et l'année n s'écrit ainsi :

$$E^{be}_{0\to n} = Q_{Fn} - Q_{F0} - \beta_b \sum_{i=1}^{n} \Phi_{Ri}\,\Delta t = \sum_{i=1}^{n} [\Phi_{Ci} - (1+\beta_b)\Phi_{Ri}]\,\Delta t \qquad (6)$$

La valeur du coefficient β_b est, en général, de l'ordre de 0,1 (total d'émissions extrinsèques de l'ordre de 10 % de l'émission de combustion intrinsèque).

N.B. L'évaluation de l'impact climatique sort du cadre de cette annexe. On trouvera dans le quatrième rapport de l'IPCC (2007) l'approche mathématique générale permettant, à partir de l'évolution de la balance capture-émission (ou de celle de l'empreinte carbone), de déterminer celle du forçage radiatif puis le pouvoir de réchauffement global associé.

B-1-3 Comptabilité carbone pour le système [forêt + bois conservé]

Le modèle de la figure 1 correspond à un scénario dans lequel le bois extrait de la forêt n'aurait comme destinée que celle de servir de combustible. Ce n'est évidemment pas le cas général et le résultat (6) ne fait que fixer une borne à l'empreinte carbone propre du système [forêt + bois récolté]. Pour cerner l'impact climatique des utilisations de la biomasse ligneuse, il convient d'examiner la situation contrefactuelle, à savoir la non-combustion du bois c'est-à-dire sa conservation pour d'autres usages. On doit pour cela se référer au modèle de la figure 3 dans lequel rien n'est changé en ce qui touche à la forêt, la seule différence par rapport au modèle de la figure 1 étant que le bois récolté (flux de carbone Φ_R) est simplement stocké ; notamment, la productivité nette Φ_C est la même, quelle que soit l'année i, que le bois récolté soit brûlé ou non.

L'évolution du stock de carbone forestier est la même que dans le cas précédent, décrite par l'équation (5). Mais à ce stock s'ajoute maintenant la masse de carbone accumulée hors forêt dans le bois conservé, soit $\sum_{i=1}^{n} \Phi_{Ri}\Delta t$.

L'empreinte carbone $E_{0\to n}^{bc}$ dans ces conditions (exposant ^{bc} pour « bois conservé ») a alors pour valeur intrinsèque :

$$E_{0\to n}^{bc} = Q_{Fn} - Q_{F0} + \sum_{i=1}^{n} \Phi_{Ri}\,\Delta t = \sum_{i=1}^{n} \Phi_{Ci}\,\Delta t \qquad (7)$$

Dans l'exemple de la figure 5, qui prolonge celui de la figure 2, cette empreinte carbone intrinsèque est représentée par la courbe (b), à comparer avec la courbe (a) décrivant le cas précédent [bois énergie].

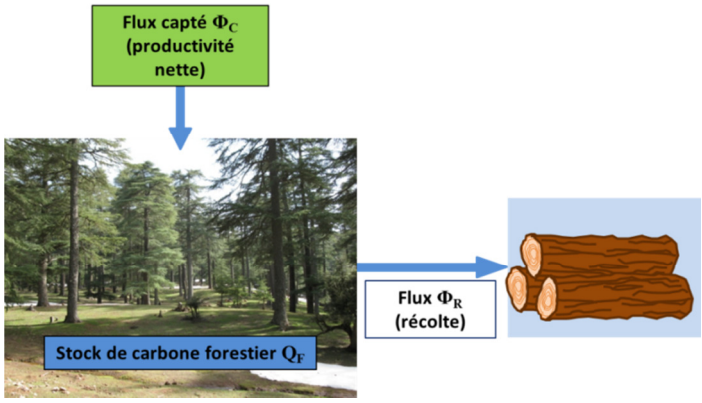


Figure 3 - Stocks et flux dans une forêt exploitée pour la capture de carbone

Si on tient compte en outre des émissions extrinsèques par l'intermédiaire d'une fraction β_b^* de la masse de carbone prélevée, on est conduit, pour l'empreinte carbone $E_{0\to n}^{bc}$ à l'expression :

$$E_{0\to n}^{bc} = Q_{Fn} - Q_{F0} + (1 - \beta_b^*) \sum_{i=1}^{n} \Phi_{Ri}\Delta t = \sum_{i=1}^{n} [\Phi_{Ci} - \beta_b^* \Phi_{Ri}]\,\Delta t \qquad (8)$$

La différence $B_{0\to n}$ des empreintes carbone entre les deux situations extrêmes décrites par les figures 1 (bois énergie) et 2 (bois conservé) est donc simplement, si l'on s'en tient aux propriétés intrinsèques du système [forêt + bois] :

$$B_{0\to n} = E_{0\to n}^{be} - E_{0\to n}^{bc} = -\sum_{i=1}^{n} \Phi_{Ri}\,\Delta t \qquad (9)$$

et si l'on prend en compte les émissions extrinsèques :

$$B_{0\to n} = -[1 + (\beta_b - \beta_b^*)] \sum_{i=1}^{n} \Phi_{Ri}\Delta t \qquad (10)$$

Les coefficients β_b et β_b^* ayant des valeurs proches (mêmes émissions liées à l'exploitation forestière, au transport des bois...), la différence des empreintes carbone se réduit donc approximativement (rigoureusement en ce qui concerne les empreintes carbone intrinsèques) au contenu carbone du bois récolté. Les résultats (9) ou (10) justifient donc 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 » (EU 2003, ADEME 2014, etc.). L'expression (10) représente le bilan carbone propre de l'utilisation du bois comme combustible, le scénario de référence étant la non-combustion du bois, la forêt restant normalement gérée et exploitée (cf. principe b rappelé en introduction de la section B-1).

B-1-4 Comptabilité carbone pour le système [forêt + bois]

Les expressions (5) et (7) (intrinsèques) ou (6) et (8) (complètes) fixent les bornes délimitant la plage des variations de l'empreinte carbone du système [forêt + bois] selon les proportions de matière ligneuse utilisée comme combustible, d'une part, conservée, dans les produits bois par exemple, d'autre part. En convenant d'imputer les émissions liées à la fabrication de produits aux filières concernées (œuvre, industrie...) et en considérant, pour simplifier, que les déchets ligneux de fabrication ainsi que les produits bois en fin de vie servent eux-mêmes de combustible, l'empreinte carbone intrinsèque du système [forêt + bois] dans le cas général d'une utilisation mixte de la récolte, peut être évaluée, de manière schématique, en se référant au modèle de la figure 4. Le stock de carbone Q_P est celui contenu dans les produits bois issus des récoltes opérées dans le domaine forestier considéré.

Pour une période courant d'une année origine 0 à une année n, l'empreinte intrinsèque $E_{0\to n}$ du système [forêt + bois] correspond à la variation du stock de carbone total :

$$E_{0\to n} = \sum_{i=1}^{n}(Q_{Fi} - Q_{Fi-1} + Q_{Pi} - Q_{Pi-1}) \quad (11)$$

En posant :

$$Q_{Pi} - Q_{Pi-1} = \gamma_i \Phi_{Ri} \Delta t \quad (12)$$

et en tenant compte de l'expression (5), on a, de manière formelle :

$$E_{0\to n} = \sum_{i=1}^{n}\{\Phi_{Ci} - (1-\gamma_i)\Phi_{Ri}\}\,\Delta t \quad (13)$$

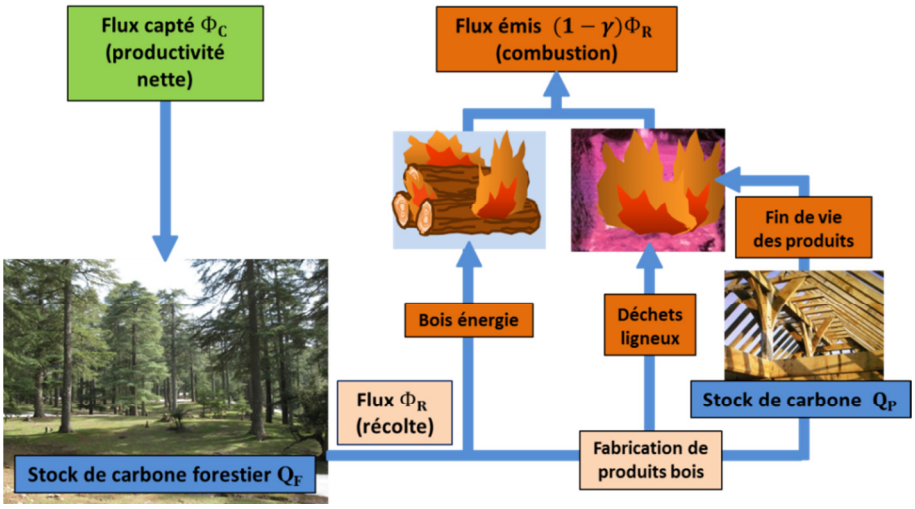


Figure 4 - Stocks et flux dans le cas d'une utilisation mixte de la récolte
(bois énergie et produits bois durables)
Le facteur γ représente la variation annuelle du stock Q_P rapportée au contenu carbone de la récolte

Le facteur γ_i représente la variation annuelle du stock Q_P rapportée au contenu carbone de la récolte. Si la forêt est exploitée uniquement pour l'énergie : $\gamma_i = 0$, si le bois récolté est entièrement conservé : $\gamma_i = 1$. le facteur γ_i peut éventuellement prendre des valeurs négatives, par exemple lorsque la production de produits bois devient insuffisante pour maintenir croissant le stock Q_P, compte tenu de la combustion des produits usagés ou obsolètes ($Q_{Pi} < Q_{Pi-1}$).

Dans l'exemple de la figure 5, 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 du facteur γ (augmentation annuelle du stock de carbone hors forêt correspondant à 30 % du contenu carbone de la matière ligneuse récoltée). Rappelons qu'une empreinte $E_{0\to n}$ positive indique que la forêt et l'utilisation de son bois ont constitué un puits net de carbone jusqu'à l'année n ; une empreinte $E_{0\to n}$ négative révèle au contraire une source nette de carbone.

Les émissions extrinsèques peuvent être prises en compte, comme dans les cas précédents, par l'intermédiaire de facteurs de proportionnalité au contenu carbone de la matière ligneuse utilisée comme combustible, d'une part (β_b), à celui des produits bois élaborés, d'autre part (β_b^*). Il peut être nécessaire de moduler la valeur du coefficient relatif à la combustion selon qu'il s'agit d'une utilisation plus ou moins directe du bois récolté (bois énergie) ou de la valorisation de déchets ligneux de fabrication, ou encore de produits bois en fin de vie.

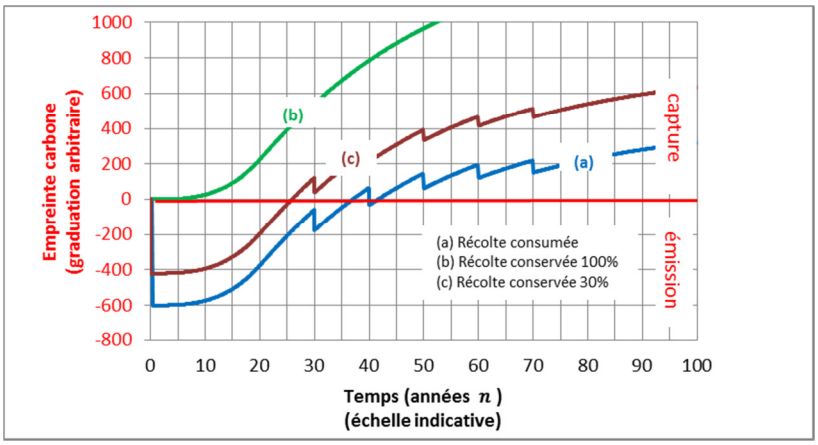


Figure 5 - Comparaison d'empreintes carbone intrinsèques du système [forêt + bois]
[Parcelle forestière replantée après coupe rase ; produits de la coupe et des éclaircies destinés à l'énergie (a), conservés en totalité (b) ou partiellement (c)]

B-1-5 Exemple : Puits de carbone de la forêt française et de l'utilisation de son bois

À partir des données d'inventaire de l'Institut Géographique National rapportables à l'année 2010 (cf. Annexe C), on peut estimer à 42,6 millions de tonnes de carbone par an (42,6 MtC/an) la production biologique annuelle nette Φ_C de la forêt française pour une surface de 16 millions d'hectares, soit près de 2,7 tonnes de carbone par an en moyenne par hectare, correspondant à 5,4 tonnes de biomasse sèche. Le contenu carbone Φ_R de la récolte est d'environ 13,7 MtC/an dont 7,9 MtC/an pour les bois d'œuvre et d'industrie

En admettant que ces chiffres ne changent guère sur une période de quelques années, l'expression (5) [ou (13) avec $\gamma = 0$] indique que si tout le bois récolté servait de combustible, la forêt française serait un puits de carbone de 28,9 MtC/an, en faisant abstraction des émissions extrinsèques. Dans l'hypothèse où tout le bois récolté serait conservé brut, l'expression (7) [ou (13) avec $\gamma = 1$], indique un puits de carbone de 42,6 MtC/an, en augmentation donc de 13,7 MtC/an par rapport au cas précédent.

En réalité, l'augmentation du stock de carbone dans les produits bois issus de la forêt française est estimée, avec beaucoup d'incertitude, à 0,9 MtC/an (Vial 2010) en sorte que la proportion γ, pour une récolte de 13,7 MtC/an, ne serait que de 6,6% (γ = 0,066). Dans ces conditions, l'expression (13) conduit à une valeur de 29,8 MtC/an pour le puits de carbone représenté par la forêt et l'utilisation de son bois, peu différente de celle résultant de l'hypothèse où tout le bois récolté servirait de combustible. Ce puits compense près de 25 % du total des émissions de carbone sous forme de CO_2 en France qui était, en 2010, de 452 $MtCO_2$ soit 123 MtC/an (CITEPA 2014). On se reportera à l'annexe C pour les détails. La prise en compte des émissions extrinsèques n'aurait qu'un impact limité sur les valeurs de puits (diminution de l'ordre de 10% au plus, suivant les valeurs de coefficients β_b et β_b^* proposées par l'ADEME 2016)

B-2 La substitution du bois aux combustibles fossiles (et l'inverse)

L'avantage – ou l'inconvénient – de la substitution de bois à un combustible fossile ne peut, en principe, être déterminé par la seule comparaison des empreintes carbone de l'utilisation de l'un et de l'autre. Étant convenu que la base de comparaison – l'unité fonctionnelle dans le vocabulaire des analyses de cycle de vie – est une même quantité de chaleur produite, une complication provient de ce que les utilisations pour l'énergie du bois ou du fossile doivent être considérées comme mutuellement exclusives, rendant disponibles pour d'autres usages, soit de la matière ligneuse, soit de la matière fossile, selon le cas. Les empreintes carbone de ces autres usages devraient donc, en toute rigueur, être elles-mêmes évaluées et intégrées, en tenant compte des « débits » ou des « crédits » qu'impliquent les substitutions de produits alors permises. Le problème devient vite d'une excessive complexité : les substitutions possibles sont si diverses, pour le bois en tant que matériau, pour les combustibles fossiles en tant que matières premières, que des conclusions globales ne peuvent être tirées que par des démarches statistiques (méta-analyses). Ainsi, selon Sathre et O'Connor 2010, la substitution de produits bois à des produits réalisés avec d'autres matériaux dont l'élaboration est énergivore (métaux, béton...) s'accompagnerait, en moyenne, d'une réduction d'émission d'environ deux tonnes par tonne de carbone stockée dans les produits bois (Sathre et O'Connor 2010). Les informations actuellement disponibles sont cependant trop incomplètes ou imprécises, y compris pour ce qui concerne les matériaux et produits issus de la chimie des combustibles fossiles (plastiques, textiles etc...), pour permettre de pousser valablement l'analyse au-delà des utilisations énergétiques. En acceptant cette restriction, le « système étudié » doit comprendre au moins la forêt, le bois qu'on en extrait et la source d'énergie alternative, et on se limite ici à la comparaison des situations duales suivantes :

- Utilisation du bois à la place d'un combustible fossile, celui-ci étant alors stocké (Figure 6 A).
- Utilisation de combustible fossile à la place de bois énergie, le bois étant alors stocké (Figure 6 B).

B-2-1 Bilans de substitution « intrinsèques »

Les bois récoltés l'année i libèrent, lors de leur combustion, une énergie W_i telle que :

$$W_i = \Phi_{Ri}\Delta t/F_b \qquad (14)$$

où F_b représente le facteur d'émission du bois, c'est-à-dire la masse de carbone émise par unité de chaleur dégagée. Pour la même énergie libérée W_i l'emploi d'un combustible fossile de facteur d'émission F_f s'accompagne d'une émission de carbone Φ_{fi} dont la valeur intrinsèque est :

$$\Phi_{fi}\Delta t = F_f W_i = F_f \Phi_{Ri} \Delta t / F_b \tag{15}$$

Par ailleurs, que le bois récolté soit ou non utilisé pour l'énergie, la forêt capte le même flux de carbone Φ_{Ci}.

Dans ces conditions, les empreintes $E^A_{0\to n}$ et $E^B_{0\to n}$, c'est-à-dire les masses nettes de carbone échangées avec l'atmosphère entre une année de référence 0 et l'année n considérée se calculent aisément pour chacun des cas schématisés sur la figure 6. En faisant tout d'abord abstraction des émissions extrinsèques, et avec toujours la convention de signe négatif pour l'émission, de signe positif pour la capture, on obtient...

... pour l'utilisation de bois énergie à la place de combustible fossile (Figure 6 A) :

$$E^A_{0\to n} = \sum_{i=1}^{n} (\Phi_{Ci} - \Phi_{Ri})\, \Delta t \tag{16}$$

... pour l'utilisation de combustible fossile à la place de bois énergie, le bois récolté étant conservé (Figure 6 B) :

$$E^B_{0\to n} = \sum_{i=1}^{n} (\Phi_{Ci} - F_f \Phi_{Ri} / F_b) \Delta t \tag{17}$$

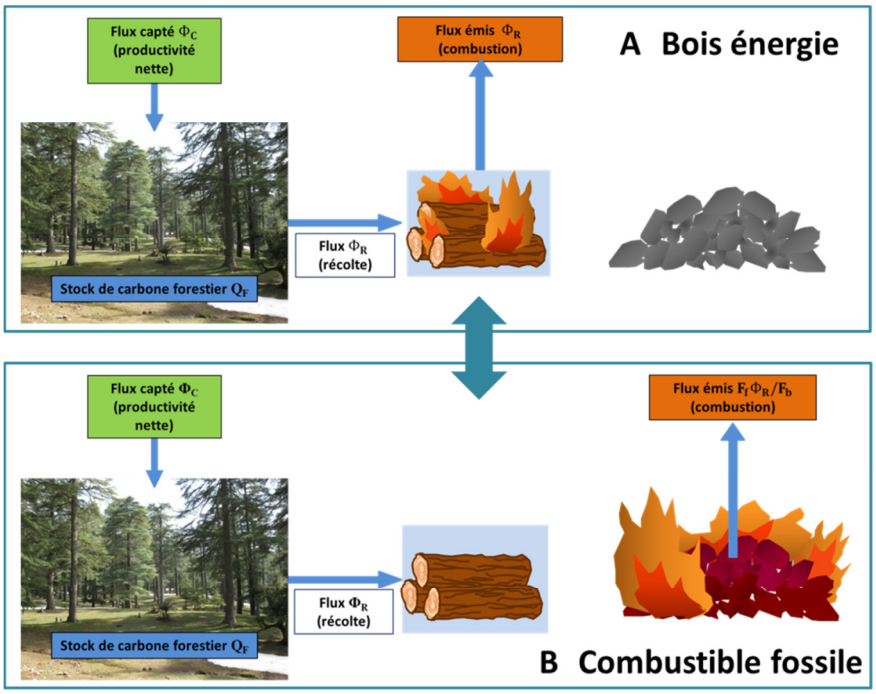


Figure 6 - Schématisation de la substitution de bois énergie à un combustible fossile (A) et de la substitution inverse (B), abstraction étant faite des émissions extrinsèques

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

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), on a $E^{A}_{0\to n} < E^{B}_{0\to n}$ 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. Ainsi, le bilan carbone $B^{b\to f}_{0\to n}$ de la substitution de bois à un combustible fossile, c'est-à-dire la différence des empreintes $E^{A}_{0\to n}$ et $E^{B}_{0\to n}$, se trouve négatif ce qui, avec la convention de signe rappelée plus haut, signifie une augmentation d'émission :

$$B^{b\to f}_{0\to n} = E^{A}_{0\to n} - E^{B}_{0\to n} = -(1 - F_f/F_b)\sum_{i=1}^{n}\Phi_{Ri}\Delta t \qquad (18)$$

Inversement, le remplacement du bois énergie par un combustible fossile permet, dans la mesure où le bois est conservé, une capture nette de carbone dans l'atmosphère :

$$B^{f\to b}_{0\to n} = E^{B}_{0\to n} - E^{A}_{0\to n} = (1 - F_f/F_b)\sum_{i=1}^{n}\Phi_{Ri}\,\Delta t \qquad (19)$$

Les bilans intrinsèques de substitution (18) et (19) sont indépendants de la gestion forestière pratiquée : la productivité nette Φ_C de la forêt n'apparaît pas. Leur valeur absolue commune peut être interprétée comme un « coût d'opportunité », c'est-à-dire la capture nette de carbone atmosphérique à laquelle on renonce en affectant le bois récolté à la production de chaleur. Rapportés au contenu carbone du bois récolté ($\sum_{i=1}^{n}\Phi_{Ri}\,\Delta t$) ou, mieux, à l'énergie libérée par combustion ($\sum_{i=1}^{n}\Phi_{Ri}\,\Delta t/F_b$), ces bilans apparaissent constants, ne dépendant que des facteurs d'émission respectifs du bois et du combustible fossile substitué ou substituant. Ainsi réduit à l'unité de chaleur produite, le bilan intrinsèque de substitution du bois à un combustible fossile s'écrit :

$$\widehat{B}^{b\to f}_{0\to n} = F_b B^{b\to f}_{0\to n}/(\sum_{i=1}^{n}\Phi_{Ri}\Delta t) = F_f - F_b \qquad (20)$$

Le tableau 1 ci-après indique, d'après l'expression (20) quelques valeurs du bilan intrinsèque de la substitution de biomasse ligneuse (anhydre) à des combustibles fossiles caractérisés par leur facteur d'émission type : charbon, pétrole, gaz naturel. Les données des facteurs d'émission sont empruntées à la « Base Carbone ® » de l'ADEME (2016), sauf en ce qui concerne le bois.

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 comptabilité de la substitution de bois énergie à un combustible fossile est illustrée par la figure 7 dans le cas simple d'une coupe rase d'un boisement suivie de régénération ou de replantation. La courbe (a) représente la variation (lissée) du stock de carbone forestier Q_{Fn} avant et après coupe et, en même temps, celle de l'empreinte carbone $E^{A}_{0\to n}$ pour une utilisation du bois récolté comme combustible (scénario A de la figure 6); cette courbe est, classiquement, de forme sigmoïdale. L'origine des temps est choisie au moment de la coupe; les échelles d'abscisse et d'ordonnées sont arbitraires. La combustion du bois récolté émet une masse de carbone correspondant à la variation

$\Phi_{R1}\Delta t$ indiquée sur la figure (indice $i = 1$ pour l'année de la coupe). Cette masse de carbone est supérieure à celle, de valeur $F_f\Phi_{R1}\Delta t/F_b$, qui aurait été émise par usage de combustible fossile pour produire la même énergie ($F_f < F_b$). La substitution du bois au combustible fossile s'accompagne donc d'un surcroît d'émission D_{C1}, que certains auteurs interprètent comme une « dette carbone » (« *carbon debt* », voir section B-3) dont la valeur absolue se confond avec celle du bilan de substitution (18) :

$$D_{C1} = (1 - F_f/F_b)\Phi_{R1}\Delta t \tag{21}$$

Dans le scénario B d'utilisation du combustible fossile à la place du bois, le stock de carbone est augmenté de celui du bois conservé ($\Phi_{R1}\Delta t$) et varie comme l'indique la courbe (b'). L'évolution (b) de l'empreinte carbone $E^B_{0\to n}$ se déduit de (b') par une translation d'ordonnée négative dont l'amplitude correspond à l'émission fossile ($F_f\Phi_{R1}\Delta t/F_b$) ou, ce qui revient au même, se déduit de la courbe (a) par une translation positive d'amplitude égale à D_{C1}. En l'absence d'autres prélèvements, les deux empreintes $E^A_{0\to n}$ (bois énergie) et $E^B_{0\to n}$ (énergie fossile) évoluent dans le sens positif en même temps que se régénère la forêt, et après un délai qui, selon la dynamique du peuplement forestier et la nature du combustible fossile, peut se chiffrer en années, décades ou même siècles, la capture de carbone par la forêt finit par l'emporter sur les émissions de combustion initiales. Il n'en reste pas moins que l'empreinte $E^B_{0\to n}$ reste supérieure à $E^A_{0\to n}$ avec un écart constant égal à D_{C1} ; par conséquent, dans la mesure où le bois récolté peut être conservé, l'usage de combustibles fossiles est encore préférable à celui du bois énergie du point de vue de l'impact « effet de serre ». Minime dans le cas du charbon, le bénéfice « effet de serre » est net dans le cas du pétrole et important lorsqu'on a recours au gaz naturel en substitution du bois énergie (cf. tableau 1) ; ce bénéfice égale le contenu carbone de la récolte si les sources substitutives sont non-carbonées, ce qui est évidemment le bon choix.

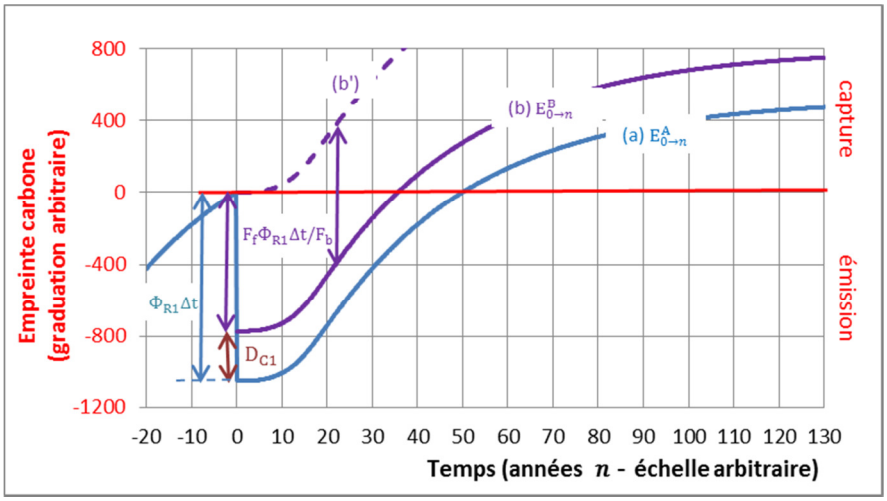


Figure 7- Empreintes carbone comparées du système [forêt + bois + combustible fossile]

(a) coupe suivie de régénération, la récolte étant utilisée pour l'énergie en substitution d'un combustible fossile ($\Phi_{R1}\Delta t$: contenu carbone de la récolte ; $F_f\Phi_{R1}\Delta t/F_b$: émission de combustion fossile ; D_{C1} : dette carbone)

(b) utilisation du combustible fossile, la récolte de bois étant conservée

(b') évolution du stock de carbone ligneux total, carbone forestier plus carbone de la récolte conservée

B-2-2 Bilan de substitution compte tenu des émissions extrinsèques

Pour le combustible fossile comme pour le bois énergie, on doit ajouter à l'émission de combustion intrinsèque un total d'émissions extrinsèques (émissions amont associées à l'exploitation, au transport, au raffinage, à la distribution du combustible... et excès d'émission de combustion par rapport au contenu carbone, comptées en « équivalent carbone C_{eq} ») commodément représenté par une certaine proportion du contenu carbone : β_f pour le fossile, β_b pour le bois. Même si les combustibles ne sont pas utilisés, une part au moins des émissions amont doit être prise en compte, à laquelle s'ajoute l'émission liée au stockage, d'où l'emploi de proportions β_f^* et β_b^* dont les valeurs peuvent être quelque peu différentes de β_f et β_b respectivement.

Dans ces conditions, étant supposé que les émissions « amont » proviennent d'autres sources d'énergie que celles ici en présence, les expressions obtenues au paragraphe précédent pour les empreintes carbone des deux situations représentées sur la figure 6 sont ainsi modifiées :

$$E_{0\to n}^{A} = \sum_{i=1}^{n}\{\Phi_{Ci} - [1 + \beta_b + \beta_f^* F_f/F_b]\Phi_{Ri}\}\,\Delta t \qquad \text{(bois énergie)} \qquad (22)$$

$$E_{0\to n}^{B} = \sum_{i=1}^{n}\{\Phi_{Ci} - [(1 + \beta_f)F_f/F_b + \beta_b^*]\Phi_{Ri}\}\,\Delta t \qquad \text{(combustible fossile)} \qquad (23)$$

Le bilan relatif $B_{0\to n}^{b\to f}$ de la substitution de bois à un combustible fossile, c'est-à-dire la différence des empreintes précédentes, s'écrit ainsi :

$$B_{0\to n}^{b\to f} = -\,[1 - F_f/F_b + (\beta_b - \beta_b^*) - (\beta_f - \beta_f^*)F_f/F_b]\sum_{i=1}^{n}\Phi_{Ri}\Delta t \qquad (24)$$

Combustible (H% : taux d'humidité)	Facteur d'émission[(1)] (tC/tep)	Émission « amont » (tC_{eq}/tep)	Émission GES excédentaire (tC_{eq}/tep)	β_b^* ou β_f^*[(3)]	β_b ou β_f[(4)]	Bilan de substitution du bois énergie au combustible fossile (tC/tep)		
Bois anhydre	1,133							
Bûches H 20%	1,174	0,034	0,059	0,029	0,079			
Plaquettes H 25%	1,189	0,035	0,042	0,029	0,065			
Granulés H 8%	1,146	0,087[(2)]	0,044	0,076	0,114			
						Bûches	Plaquettes	Granulés
Charbon aggloméré	1,088	0,101	0,008	0,093	0,1	-0,137 (-0,086)	-0,135 (-0,101)	-0,094 (-0,058)
Pétrole brut	0,833	0,074	0,002	0,089	0,091	-0,398 (-0,341)	-0,396 (-0,356)	-0,355 (-0,313)
Gaz naturel	0,638	0,101	0,008	0,158	0,171	-0,587 (-0,536)	-0,585 (-0,551)	-0,544 (-0,508)

(1) Émission de combustion intrinsèque par unité d'énergie

(2) Pour les granulés (pellets), la valeur d'émission « amont » avancée dans la base carbone de l'ADEME ne porte que sur les étapes entre un approvisionnement en sciures et la mise à disposition; la valeur proposée intègre les étapes antérieures d'exploitation forestière, de transport, de broyage et de séchage

(3) émission « amont » rapportée à l'émission de combustion intrinsèque

(4) somme des émissions extrinsèques rapportée à l'émission de combustion intrinsèque

Tableau 2 – Valeurs-types du bilan carbone de la substitution de bois énergie à du combustible fossile d'après des données de la « base carbone » de l'ADEME

Ces valeurs ne sont qu'indicatives et doivent être considérées dans leur ordre de grandeur

Le signe (-) affectant les valeurs de bilan souligne qu'il s'agit d'une augmentation d'émission

Les valeurs de bilan entre parenthèses sont calculées à partir des seuls facteurs d'émission intrinsèques

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

Le tableau 2 indique des valeurs types de l'augmentation d'émission résultant de la substitution, aux principaux combustibles fossiles, de bois conditionné sous différentes formes; les données sont empruntées à la « Base Carbone ® » de l'ADEME (2016), sauf en ce qui concerne le contenu carbone des bois et la valeur d'émission amont des granulés (pellets). Les valeurs de bilan de substitution sont obtenues en se référant, comme pour l'établissement du tableau 1, à l'unité de chaleur produite :

$$\widehat{\mathrm{B}}_{0\to n}^{\mathrm{b}\to\mathrm{f}} = \mathrm{F_b}\mathrm{B}_{0\to n}^{\mathrm{b}\to\mathrm{f}}/(\textstyle\sum_{i=1}^{n}\Phi_{\mathrm{R}i}\Delta\mathrm{t}) = -\,[\mathrm{F_b} - \mathrm{F_f} + \mathrm{F_b}(\beta_\mathrm{b} - \beta_\mathrm{b}^*) - (\beta_\mathrm{f} - \beta_\mathrm{f}^*)\mathrm{F_f}] \qquad (25)$$

On a admis, pour simplifier, que les différences entre coefficients β_b et β_b^*, d'une part, entre coefficients β_f et β_f^*, d'autre part, sont essentiellement liées à l'excès d'émission de gaz à effet de serre par rapport au contenu carbone, les émissions amont étant sensiblement les mêmes que le combustible soit utilisé comme tel ou simplement conservé. En pratique, les valeurs de bilan diffèrent peu de celles qu'on peut estimer en faisant abstraction des émissions extrinsèques, c'est-à-dire en se référant à l'expression (18) ; ces valeurs intrinsèques sont indiquées entre parenthèses dans le tableau.

Sauf cas particuliers liés à des valeurs inhabituelles d'émissions extrinsèques, la substitution de bois énergie à un combustible fossile implique donc, généralement, une augmentation des émissions (ou, ce qui revient au même, une diminution des captures). La promotion du bois énergie comme moyen de réduire globalement les émissions de CO_2 est donc sans fondement, et contre-productive dans la mesure où le bois récolté peut être utilisé durablement ou conservé (Leturcq 2011).

B-3 Discussion : bilan de substitution par rapport à un scénario de non-exploitation de la forêt

La conclusion du développement qui précède est que la substitution de bois énergie à un combustible fossile entraîne un accroissement global 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).

Aussi est-il indispensable, avec l'éclairage qu'apporte la section B-2, de mettre en évidence les failles des argumentations en vigueur. Pour aller à l'essentiel dans cette discussion, on fera abstraction des émissions extrinsèques liées à la production et l'usage des combustibles.

On ne reviendra pas sur l'assertion de « neutralité carbone de la biomasse », déjà discutée dans le paragraphe B-1-1. Rappelons seulement que l'affirmation de neutralité carbone, non seulement suppose que la biomasse consumée est renouvelée en égale quantité dans l'écosystème où elle a été prélevée, mais encore fait fi de ce que cette biomasse aurait pu 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 (Mitchell et coll. 2012 ; Ter-Mikaelian et coll. 2015b).

La différence principale par rapport à la conception de substitution illustrée par la figure 6 est que le scénario de référence (la situation contrefactuelle) est l'absence de récolte, la forêt étant supposée abandonnée à son évolution naturelle (Figure 8).

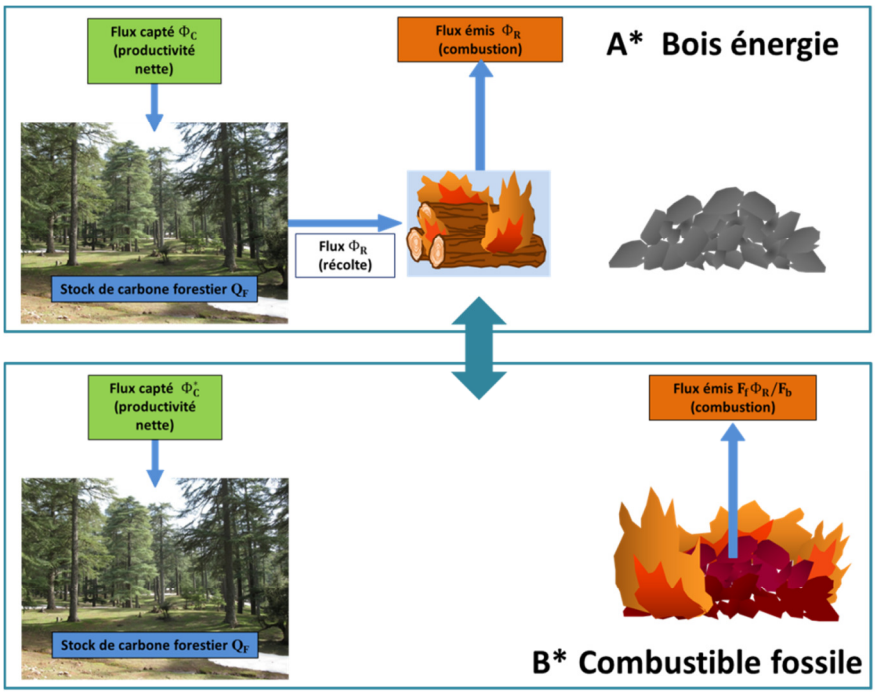


Figure 8 - Substitution de bois énergie à un combustible fossile (A*) et substitution inverse (B*). Dans le scénario (B*), la forêt reste inexploitée, abandonnée à son évolution naturelle

La référence est une même quantité de chaleur $W = \Phi_R \Delta t / F_b$; F_b et F_f représentent les facteurs d'émission du bois et du combustible fossile respectivement. Abstraction est faite des émissions « amont ».

Le scénario 8 A* est identique à celui décrit par la figure 6 A. Dans le scénario 8 B*, l'évolution du stock de carbone forestier est modifiée de deux manières par rapport à celui de la figure 6 B : le flux de carbone Φ_R associé à la récolte de bois est annulé et le flux de carbone Φ_C^* capturé dans l'atmosphère diffère de Φ_C en raison même de la non-exploitation de la forêt. Un cheminement parallèle à celui du paragraphe B-2-1 conduit aux expressions suivantes des empreintes carbone et bilans de substitution intrinsèques, en correspondance des expressions (16) à (18) :

Empreinte, pour la période $0 \to n$, de l'utilisation de bois énergie à la place de combustible fossile (Figure 8 A*)

$$E_{0\to n}^{A*} = \sum_{i=1}^{n} (\Phi_{Ci} - \Phi_{Ri}) \Delta t = E_{0\to n}^{A} \tag{26}$$

Empreinte, pour la période $0 \to n$, de l'utilisation de combustible fossile à la place de bois énergie, la forêt restant inexploitée (Figure 8 B*) :

$$E_{0\to n}^{B*} = \sum_{i=1}^{n} (\Phi_{Ci}^* - F_f \Phi_{Ri}/F_b) \Delta t \neq E_{0\to n}^{B} \tag{27}$$

Bilan carbone $B_{0\to n}^{*b\to f}$ de la substitution de bois à un combustible fossile sur la même période de temps :

$$B_{0\to n}^{*b\to f} = E_{0\to n}^{A*} - E_{0\to n}^{B*} = \sum_{i=1}^{n} [\Phi_{Ci} - \Phi_{Ci}^* - (1 - F_f/F_b)\Phi_{Ri}] \, \Delta t \tag{28}$$

Dans la mesure où la productivité nette Φ_{Ci} d'une forêt gérée durablement et normalement exploitée est supérieure à celle Φ^*_{Ci} qu'on observerait si cette forêt était abandonnée à son évolution naturelle, la différence $\Phi_{Ci} - \Phi^*_{Ci}$ est positive et le bilan de substitution ainsi calculé est – apparemment – moins défavorable du point de vue de l'impact sur l'effet de serre que celui donné par l'expression (18). Il se peut même, selon les évolutions respectives de Φ_{Ci} et Φ^*_{Ci} que le bilan (28) puisse devenir favorable (positif) pour la période considérée, si :

$$\sum_{i=1}^{n}[\Phi_{Ci} - \Phi^*_{Ci}]\Delta t > (1 - F_f/F_b)\sum_{i=1}^{n}\Phi_{Ri}\,\Delta t \qquad (29)$$

Cette conception de substitution de bois énergie à un combustible fossile par référence à un scénario de non-récolte est illustrée par la figure 9 pour le même cas d'exemple de la figure 6 : coupe rase d'un boisement suivie de régénération ou de replantation, le produit de la coupe étant destiné à l'énergie.

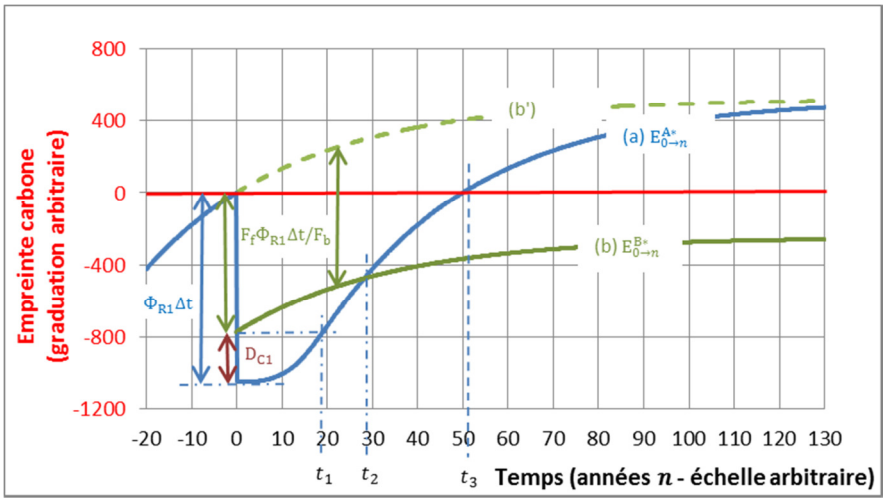


Figure 9 - Empreintes carbone comparées du système [forêt + bois + combustible fossile]

(a) coupe suivie de régénération, la récolte étant utilisée pour l'énergie en substitution d'un combustible fossile ($\Phi_{R1}\Delta t$: contenu carbone de la récolte ; D_{C1} : dette carbone ; $F_f\Phi_{R1}\Delta t/F_b$: émission de combustion fossile)

(b) utilisation du combustible fossile, la forêt étant abandonnée à son évolution naturelle

(b') évolution du stock de carbone forestier en l'absence de coupe

Les temps repérés en abscisse correspondent, dans le scénario (a), au délai de remboursement de la dette carbone (t_1), au temps nécessaire pour que le bilan de substitution devienne positif par référence à un scénario de non-récolte (t_2), au temps pour lequel l'émission de combustion du bois énergie ($\Phi_{R1}\Delta t$) se trouve compensée par la capture de carbone (t_3)

La courbe (a) qui représente la variation du stock de carbone forestier avant et après coupe et, en même temps, celle de l'empreinte carbone $E^{A*}_{0\to n}$ pour une utilisation comme combustible du bois récolté, est la même dans les deux figures. Comme cela a été signalé plus haut, le surcroît d'émission :

$$D_{C1} = (1 - F_f/F_b)\Phi_{R1}\Delta t \qquad (22)$$

qu'implique la substitution de bois au combustible fossile, est interprété comme une « dette carbone » (« *carbon debt* » ; Walker et coll. 2010) que la capture de carbone par la forêt en cours de

régénération permet de « rembourser » après un délai t_1 qui apparaît graphiquement sur la figure 9 (« *payback time* »).

La courbe (b) représentant l'évolution de l'empreinte carbone $\mathrm{E}_{0\to n}^{\mathrm{B}*}$ dans le scénario d'utilisation du combustible fossile s'obtient à partir de la courbe (b') qui figure l'évolution naturelle du stock de carbone forestier en l'absence de coupe ($\sum_{i=1}^{n} \Phi_{\mathrm{C}i}^{*}\,\Delta\mathrm{t}$), par une translation négative dont l'amplitude correspond à l'émission de combustion fossile ($\mathrm{F_f}\Phi_{\mathrm{R1}}\Delta\mathrm{t}/\mathrm{F_b}$).

Contrairement à ce qu'on observe dans la figure 6, les courbes représentatives des empreintes carbone $\mathrm{E}_{0\to n}^{\mathrm{A}*}$ et $\mathrm{E}_{0\to n}^{\mathrm{B}*}$ se croisent, ce qui signifierait qu'après un délai t_2 après coupe, le bilan de substitution du bois au combustible fossile devient favorable (positif), la condition (28) étant alors satisfaite. Ce temps t_2 est désigné par les auteurs comme celui permettant d'atteindre la « parité » de séquestration de carbone (« *time to carbon sequestration parity* ») entre les deux scénarios A* et B* de la figure 8. Enfin, au temps t_3 indiqué sur la figure, le stock de carbone forestier $\mathrm{Q}_{\mathrm{F}n}$ est reconstitué à son niveau Q_{F0} précédant immédiatement la coupe, l'empreinte carbone $\mathrm{E}_{0\to n}^{\mathrm{A}*}$ s'annule pour devenir positive et certains auteurs estiment qu'il s'agit là d'une « neutralité carbone » recouvrée quoique différée.

L'établissement d'un bilan carbone par rapport à un scénario de forêt non exploitée, illustré ici dans un cas simple, est applicable, par superposition, à une mosaïque de peuplements. Un certain nombre d'études récentes se réfèrent à cette conception comptable et utilisent les temps t_1, t_2 et t_3 comme critères d'appréciation du bien-fondé du remplacement de combustibles fossiles par du bois énergie, dans des contextes divers. Les résultats diffèrent considérablement selon la dynamique des massifs forestiers producteurs, les scénarios d'exploitation et d'utilisation de la biomasse ligneuse, la nature du combustible fossile substitué, l'importance relative des émissions extrinsèques, etc... D'après une étude bibliographique du Joint Research Center de la Commission européenne (Agostini et coll. 2014), le remboursement de la dette carbone (« *payback* ») peut prendre, selon les cas, quelques années ou... plusieurs siècles. Le bilan même de la substitution, avec cette référence à la capture de carbone que permettrait la libre évolution du domaine forestier, ne devient positif qu'avec des délais qui peuvent être beaucoup plus longs ($t > t_2$).

La conception que résument la figure 9 et les expressions (26) à (29) est, comme celle exposée dans la section B-2 du présent document, en rupture avec celle d'une illusoire neutralité carbone de la biomasse. Cependant, le scénario de référence (« *baseline* ») est celui de laisser la forêt inexploitée, abandonnée à son évolution naturelle, sans que soit envisagée une utilisation plus ou moins durable de la production ligneuse, comme bois d'œuvre ou d'industrie notamment. Un tel scénario ne présente guère d'intérêt, même dans un souci de capture et de séquestration du carbone, car une évolution naturelle des forêts fait tendre asymptotiquement celles-ci vers un état d'équilibre entre production biologique et mortalité, c'est-à-dire entre capture et émission de carbone : dans cette hypothèse, non seulement la forêt n'est productrice d'aucun bien, mais son rôle vis-à-vis de l'effet de serre finit par devenir nul. La possibilité d'un bilan favorable, même tardivement, pour la substitution du bois à un combustible fossile apparaît donc artificielle, due à la médiocrité du scénario de référence choisi. La comparaison des courbes représentatives des empreintes carbone des scénarios « bois conservé » (scénario B de la figure 6, courbe (b) $\mathrm{E}_{0\to n}^{\mathrm{B}}$ de la figure 7) et « non-récolte » (scénario B* de la figure 8, courbe (b) $\mathrm{E}_{0\to n}^{\mathrm{B}*}$ de la figure 9) permet d'affirmer qu'il en est bien ainsi.

B-4 Conclusion

Cette annexe propose les règles d'une comptabilité carbone simplifiée des usages du bois qui tient compte du rôle actif de la forêt dans la capture du carbone atmosphérique. L'accent est mis sur le « bois énergie », dont la substitution à des combustibles fossiles se révèle contraire à l'objectif de réduction des émissions de gaz à effet de serre. Quatre arguments méritent d'être soulignés :

- Prétexter de ce que le bois utilisé comme combustible ne fait que rendre à l'atmosphère le carbone qui y a été capté, pour affirmer *a priori* la « neutralité » de cette combustion vis-à-vis de l'effet de serre, est une proposition abusive. Celle-ci présuppose en effet, non seulement que la biomasse extraite de l'écosystème considéré, ou perdue lors de l'exploitation, est renouvelée de manière synchrone et en égale quantité, ce qui ne peut être qu'un cas particulier, mais encore que le bois ne peut avoir d'autre destinée que de servir de combustible.

- En réalité, en brûlant du bois qui pourrait être conservé sous forme brute ou transformée, on obère la fonction de « puits » de carbone de la forêt qui le produit. L'impact de cette combustion doit donc être comptabilisé dans l'empreinte carbone du système forêt-bois soit comme augmentation du niveau d'émission, soit comme diminution de celui de capture.

- Le facteur d'émission de la matière ligneuse (de la biomasse en général) est plus élevé que celui de toute autre source de chaleur, carbonée ou non, ce qui rend contreproductive la substitution du bois à tout autre combustible.

- Au contraire, la conservation du bois en forêt sur pied ou hors forêt sous forme brute ou transformée est positive du point de vue de l'impact climatique, sous réserve, naturellement, que les inévitables émissions « grises » (auxquelles on peut joindre celles qui peuvent résulter de la décomposition de matière ligneuse) ne fassent perdre le bénéfice espéré de la séquestration. La variation du stock de carbone ligneux total en forêt et hors forêt étant l'image des échanges du système forêt-bois avec l'atmosphère, tout doit être fait pour augmenter ce stock, ce qui implique, notamment, une optimisation de la production forestière et la recherche des conditions d'une conservation effective de la matière ligneuse sur un long terme.

Cependant, les formulations proposées dans cette annexe, pour le calcul de l'empreinte carbone de la forêt et de l'utilisation de son bois, restent formelles tant que ne sont pas précisées, pour le massif forestier producteur considéré, la productivité nette Φ_{C} et son évolution dans le temps ($\Phi_{\mathrm{C}i}$). Cette productivité nette est la différence entre le flux annuel brut de carbone par lequel se constitue la biomasse forestière (désigné aussi comme production biologique brute annuelle) et le flux de carbone rendu à l'atmosphère par la décomposition de la nécromasse ; son évaluation nécessite donc une description d'ensemble de la dynamique du carbone dans les différents compartiments forestiers : c'est l'objet des annexes suivantes C et D.

Références bibliographiques

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/*

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

CITEPA (2014) Inventaire des émissions de polluants atmosphériques et de gaz à effet de serre en France – Format SECTEN © CITEPA 2014

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

EU (2003) Directive 2003/87/CE du Parlement européen et du Conseil du 13 octobre 2003 établissant un système d'échange de quotas d'émission de gaz à effet de serre dans la Communauté, Journal officiel de l'Union européenne, 25.10.2003, Annexe IV, page L 275/44

EU (2013) Décision (UE) n° 529/2013 du Parlement européen et du Conseil du 21 mai 2013 relative aux règles comptables concernant les émissions et les absorptions de gaz à effet de serre résultant des activités liées à l'utilisation des terres, au changement d'affectation des terres et à la foresterie et aux informations concernant les actions liées à ces activités

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

IPCC (1996) Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Reference manual, Chapter 5 Land-Use Change & Forestry

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 and Volume 4 : Agriculture, Forestry and Other Land Use, Chapter 4 : Forest Land

IPCC (2007) Climate change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon S, Qin D, Manning M, Chen Z, Marquis M, Averyt KB, Tignor M, Miller HL (eds)]. Cambridge University Press. Section 2.10 Global Warming Potentials and Other Metrics for Comparing Different Emissions

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

Leturcq P (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

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

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

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

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

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

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

Vial E (2010) Comptabilisation du carbone dans les produits bois en France, Copyright FCBA INFO, Décembre 2010

Walker T, Cardellichio P, Colnes A, Gunn J, Kittler B, Persche B, Recchia C, Saah D (2010) Biomass Sustainability and Carbon Policy Study. Manomet Center for Conservation Sciences, June 2010, NCI-2010-03.

ANNEXE C : Le puits de carbone forestier.
Exemple de la forêt française métropolitaine.

« Ne me dites pas que ce problème est difficile.
S'il n'était pas difficile ce ne serait pas un problème »

(Maréchal Foch)

L'influence climatique **directe** de la forêt réside essentiellement dans ses échanges de carbone avec l'atmosphère : capture par les écosystèmes forestiers et stockage dans la biomasse constituée, d'une part, émission par oxydation de cette biomasse (biodégradation ou combustion), d'autre part. La balance capture-émission de ces échanges sur une période de temps donnée (« empreinte carbone ») équivaut à la variation du stock total de carbone contenu dans la biomasse vivante ou morte, principalement ligneuse, y compris le carbone contenu dans les produits que l'on a extrait de la forêt et celui de la matière organique incorporée au sol. La quantification du rôle de puits ou de source de carbone que joue la forêt vis-à-vis de l'atmosphère passe donc par un inventaire des stocks et l'appréciation de leur variation.

En outre, la plupart des analystes de la contribution des écosystèmes forestiers à l'atténuation du changement climatique prennent en considération l'effet **indirect** possible, sur le bilan des échanges avec l'atmosphère, de la substitution du bois récolté à d'autres matières ou matériaux. Deux types de substitution sont envisagés : substitution « matériau » lorsque, pour une même fonction réalisée, un produit bois a une empreinte carbone inférieure à celle du produit en usage, substitution « énergétique » lorsqu'on remplace des combustibles ou carburants d'origine fossile par du bois ou ses dérivés.

Cette annexe propose une évaluation du puits de carbone représenté par la forêt métropolitaine française et l'utilisation de son bois, non pour reproduire ce qui est fait annuellement par l'IGN (Institut national de l'information géographique et forestière) et le CITEPA (Centre interprofessionnel technique d'études de la pollution atmosphérique), mais afin de disposer de valeurs de paramètres et de conditions initiales plausibles pour des projections à plus ou moins long terme de l'évolution de ce puits en différentes circonstances (cf. annexe D). La méthode suivie qui, pour une bonne part, est

codifiée par des instances internationales (IPCC, FAO...) est, en fait, applicable à n'importe quel ensemble forestier. Cependant, si l'on s'affranchit du dogme de « neutralité carbone » on est amené à contester ou à nuancer les évaluations favorables qui sont actuellement faites des substitutions « énergétique » et « matériau » : la première accroît les émissions au lieu de les diminuer (cf. annexe B) et la seconde n'est pas aussi bénéfique que ce qu'on admet ordinairement lorsqu'on l'associe à la précédente dans un souci de valorisation des déchets ligneux et des produits bois en fin de vie.

C-1 Généralités

La figure 1 propose un schéma simplifié des échanges de carbone entre l'atmosphère, d'une part, la forêt et les filières d'utilisation de son bois, d'autre part. Ce schéma fait la synthèse de ceux qui ont été utilisés dans l'annexe B. Le périmètre considéré peut être quelconque : il peut s'agir d'un peuplement particulier, d'un massif forestier, de la forêt française toute entière ou de l'ensemble des forêts du globe.

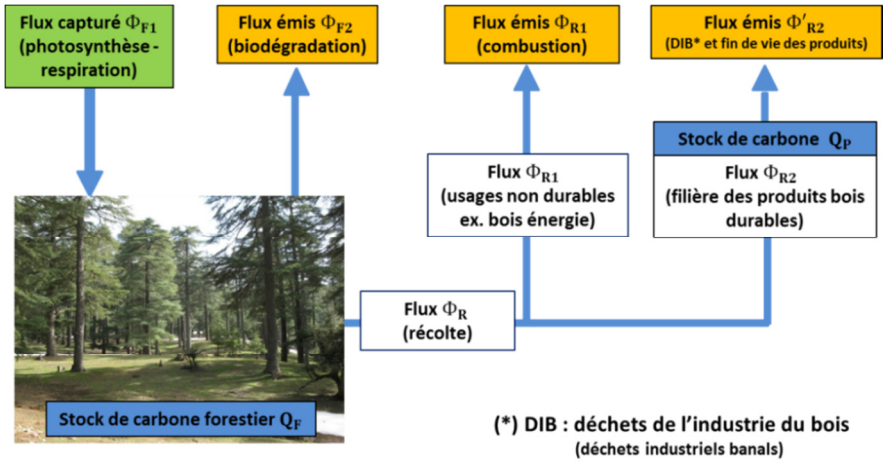


Figure 1 - Stocks et flux de carbone dans la forêt et les filières d'utilisation du bois

Le stock de carbone forestier Q_F est réparti dans des « compartiments » dont les principaux sont les troncs, branches et racines des arbres vivants, le bois mort sur pied ou au sol, les racines mortes, le feuillage et la végétation du sous-bois, la litière et le sol. Les « produits bois » séquestrent par ailleurs un stock de carbone Q_P qui s'ajoute au stock proprement forestier Q_F.

Les « flux » indiqués sur la figure 1 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, notamment ligneuse ; ce flux résulte de la différence des flux de carbone 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 à l'atmosphère la décomposition de la matière organique morte ou l'incendie ; on néglige des composantes mineures de ce flux comme l'emport de carbone par les eaux de ruissellement et d'infiltration, l'émission par le feuillage de composés organiques volatils ou encore la consommation des animaux herbivores. La différence $\Phi_C = \Phi_{F1} - \Phi_{F2}$ représente ainsi la productivité nette de l'écosystème forestier considéré (PNE). Aux récoltes en forêt correspond la somme $\Phi_R = \Phi_{R1} + \Phi_{R2}$ du flux de carbone Φ_{R1} emporté par le bois à usage quasi immédiat de combustible et du flux Φ_{R2} entrant dans la filière des « produits bois », d'œuvre et d'industrie, dont le stock est Q_P. Les déchets de l'industrie du bois (DIB) et les

produits bois en fin de vie qui ne peuvent être recyclés finissent par se décomposer ou sont brûlés pour fournir de l'énergie; dans les deux cas, ils rendent du carbone à l'atmosphère (flux Φ'_{R2}). Dans ce qui suit, la distinction entre le carbone (C) et le dioxyde de carbone (CO_2) est implicite, avec la correspondance de masse : 12 grammes de C ≈ 44 grammes de CO_2.

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 ses variations annuelles peut être faite selon une méthode codifiée 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 d'autres compartiments (IPCC 2006 ; IPCC 2013). Le choix du « volume bois fort tige » comme donnée principale découle de la relative facilité avec laquelle on peut le mesurer à l'aide d'un tarif de cubage propre à chaque essence : ce volume correspond, pour les arbres dits « recensables » (diamètre supérieur à 7,5 cm à 1,3 m de hauteur), à celui de la tige principale depuis le sol jusqu'à un diamètre « fin bout » de 7 cm (IFN 2011). 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. Il faut encore tenir compte de compartiments tels que le feuillage, les racines fines et les mycéliums associés, la végétation herbacée... qu'on regroupera, dans ce qui suit, en un compartiment de « biomasse non ligneuse », sur lequel 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, ou échangés entre les différents compartiments, procède de la comparaison de données d'inventaires réalisés consécutivement à intervalles de temps de quelques années.

C-2 Stocks et flux de carbone

À des fins didactiques et pour justifier des chiffres utilisés dans la présente annexe et la suivante, on procède ici à une estimation sommaire des stocks de carbone et des flux recensés sur la figure 1 pour l'ensemble des forêts de production françaises, sur la base des données collectées dans le cadre du programme permanent d'inventaire des ressources forestières (Inventaire forestier national IFN) conduit par l'IGN.

C-2-1 Données d'inventaire et facteurs de conversion

L'inventaire IFN consiste en mesures et observations pratiquées sur des placettes circulaires concentriques de 6 à 25 mètres de rayon selon l'information recherchée, distribuées dans l'ensemble du domaine forestier, plus densément en forêt de montagne (IGN 2014a). Les campagnes annuelles portent sur un cinquième des quelque 35000 points d'inventaire actuellement définis en sorte que

les résultats statistiques obtenus en cumulant les informations issues de cinq campagnes consécutives sont représentatifs de l'état de la forêt française avec un recul de trois ans par rapport à l'année de publication (IFN 2011) : par exemple, les résultats issus des campagnes d'inventaire 2008 à 2012 (IGN 2013), peuvent être rapportés à l'année « moyenne» 2010. En ce qui concerne les flux toutefois (production biologique, prélèvement et mortalité annuels...), leur détermination nécessitant la comparaison des stocks entre deux visites successives de chaque point d'inventaire, les résultats ne sont définitivement acquis qu'au terme de dix campagnes et correspondent alors à des moyennes sur neuf années de végétation. Aussi, la référence à l'année 2010 pour la présente illustration n'est-elle qu'indicative ; ce choix découle de la disponibilité, dans la littérature, d'un ensemble de données raisonnablement convergentes mais qui couvrent, en réalité, une période de plusieurs années de part et d'autre.

Le tableau 1 récapitule des valeurs de facteurs d'expansion, infra-densités et proportion massique de carbone souvent utilisées en France pour convertir le volume de bois fort tige en volumes réels aérien, racinaire et volume de l'arbre entier, puis en contenus carbone (cf. par exemple Dupouey et coll. 2010). Le niveau de détail s'arrête ici à la distinction entre essences feuillues et résineuses, ce qui est suffisant pour des estimations d'ordres de grandeur. Ces valeurs sont celles qui ont été proposées dans l'étude « Carbofor » (2004), à l'exception de la proportion massique de carbone dans la biomasse ligneuse anhydre ; en cohérence avec la composition élémentaire moyenne du bois (cf. annexe A), on a retenu la valeur 0,5 pour cette proportion massique (0,475 dans l'étude « Carbofor »). En raison de la variabilité des facteurs d'expansion, au cas par cas, selon l'essence, la station, l'âge et le volume des arbres, etc. (cf. par exemple Saint-André et coll. 2010), les marges d'incertitude sur le rapport global permettant la conversion du volume bois fort tige en masse de carbone (dernière ligne du tableau 1) sont importantes, pouvant atteindre ± 15-20 % pour les feuillus et ± 20-25 % pour les résineux selon Dhôte et coll. (2016). C'est dire que la précision apparente des chiffres indiqués dans le tableau 1 ne répond qu'au souci de préserver la cohérence arithmétique de leurs rapports et que les résultats de l'exploitation des inventaires ne doivent être acceptés que dans leur ordre de grandeur.

	FEUILLUS	RÉSINEUX
Facteur d'expansion « branches » (volume aérien ligneux / volume bois fort tige)	1,61	1,33
Facteur d'expansion « racines » (volume ligneux total / volume aérien)	1,28	1,3
Facteur d'expansion global (volume ligneux total / volume bois fort tige)	2,06	1,73
Infra-densité du bois (t/m^3) (masse anhydre / volume du bois vert)	0,55	0,44
Proportion massique de carbone (masse de carbone / masse anhydre du bois)	0,5	0,5
Rapport global (tC/m^3) (masse de carbone / volume de bois fort tige)	0,567	0,38

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

C-2-2 Stocks de carbone dans la forêt Q_F et dans les produits bois Q_P

Selon les résultats d'inventaire rapportables à l'année 2010 (IGN 2013, MAAF et IGN 2016), la surface forestière de production en France métropolitaine est d'environ 16 millions d'hectares dont ≈ 70 % à dominance feuillue et ≈ 30 % à dominance résineuse. Le volume de bois fort tige est de l'ordre de 2,5 milliards de mètres cubes ($2{,}5\times10^9$ m^3 ou 2,5 km^3) soit, en moyenne, un peu plus de 155 m^3/ha. Ce volume se répartit en $1{,}625\times10^9$ m^3 pour les bois feuillus (≈ 65 %) et $0{,}890\times10^9$ m^3 pour les résineux (≈ 35 %). Le volume ligneux aérien réel peut donc être évalué à $3{,}8\times10^9$ m^3 (237 m^3/ha), le volume ligneux total à $4{,}9\times10^9$ m^3 (306 m^3/ha) et la masse de carbone contenue dans la biomasse ligneuse des arbres recensables à 1,26 gigatonnes (1,26 GtC) soit, en moyenne, 79 tC/ha. Cette masse de carbone se répartit en 980 millions de tonnes pour la partie aérienne (feuillus : 720 MtC, résineux : 260 MtC) et 280 millions de tonnes pour la partie racinaire (feuillus : 200 MtC, résineux : 80 MtC). Ces chiffres ne portent que sur les arbres recensés (diamètre à 1,3 m de hauteur supérieur à 7,5 cm), laissant donc de côté tous les jeunes peuplements par boisement spontané, plantation ou régénération en forêt, ce qui introduit un biais difficile à évaluer mais pouvant être notable (Dupouey et Pignard 2001).

Les estimations que l'on peut faire pour les stocks de carbone autres que ceux des compartiments de bois vif sont beaucoup plus incertaines.

Le volume de bois mort sur pied et chablis inventorié par l'IGN est de 116 millions de mètres cubes (116×10^6 m^3, volume « bois fort tige ») soit, en moyenne, 7,25 m^3/ha dont environ 60 % de feuillus (IGN 2013). Ce bois, pour moitié mort depuis moins de cinq ans (IGN 2012a), est majoritairement intact ou faiblement décomposé et, sous réserve que puissent être encore appliqués les mêmes coefficients que pour le bois vif dans l'estimation du contenu carbone, on est conduit à un chiffre de ≈ 57 MtC réparties en ≈ 44 MtC pour la partie aérienne et ≈ 13 MtC pour la partie racinaire. Le volume de bois mort au sol (volume réel cette fois) est de 261×10^6 m^3 (≈ 16,3 m^3/ha), la part des essences feuillues étant à peu près la même que précédemment. En conservant les valeurs d'infra-densités et de proportion massique de carbone indiquées dans le tableau 1, on aboutirait à un stock de 66 MtC ; cependant, la moitié au moins de ce bois mort au sol est fortement décomposée (IGN 2012a), ce qui incite à ne retenir, en première estimation, que la moitié de ce chiffre : 33 MtC. La biomasse ligneuse morte comprend également, à tous les stades de décomposition, les racines des arbres morts autres que ceux inventoriés ci-dessus comme « morts sur pied et chablis » ainsi que les racines des arbres exploités, qui sont généralement laissées en place ; le stock de carbone correspondant est incertain mais sans doute considérable. Les taux de mortalité, l'importance des prélèvements et l'ordre de grandeur des constantes de temps de décomposition permettent d'avancer, comme valeurs médianes des plages d'incertitude, les chiffres de ≈ 23 MtC pour les racines des arbres morts naturellement (y compris celles des arbres morts sur pied et chablis) et ≈ 143 MtC pour les racines des arbres exploités (cf. paragraphe C-2-3-2 b). On retiendra, pour la suite de l'illustration, les chiffres de 44+33 = 77 MtC pour le contenu carbone du compartiment « bois mort (aérien) » et de 23+143 = 166 MtC pour celui des « racines mortes ».

Les contributions du feuillage et d'autres compartiments non ligneux (racines fines, mycéliums), ainsi que de la végétation du sous-bois ne sont pas négligeables mais insuffisamment documentées. Pour le feuillage, un chiffre de 40 MtC est avancé par l'IFN (2005). Les racines fines représentent au moins 5 % de la biomasse des racines ligneuses (Garbaye 2006, Brunner et Godbold 2007), ce qui permet

une estimation de ≈ 14 MtC à laquelle conduisent également quelques données collectées sur diverses essences feuillues et résineuses (Brunner et coll. 2013). Les chiffres publiés sur la part des mycéliums des champignons symbiotiques sont très dispersés, de quelques dizaines à quelques centaines de grammes de biomasse par mètre carré selon les essences d'arbres (Godbold et coll. 2006), et peuvent conduire, pour l'ensemble de la forêt, à un contenu carbone comparable à celui des racines fines. La végétation du sous-bois (fougères, mousses, herbacées) compte pour environ 1 tC/ha selon une estimation ancienne (AGRIGES 1999 *in* Carbofor 2004) soit 16 MtC pour l'ensemble du domaine forestier. Au total, le compartiment « biomasse non ligneuse » contiendrait de l'ordre de 80 millions de tonnes de carbone que l'on peut ventiler approximativement en 55 MtC pour la part aérienne (feuillage et végétation du sous-bois) et 25 MtC pour la part souterraine (racines fines et mycéliums), ces chiffres étant avancés sous réserve, en l'absence de données sûres. On ne cite que pour mémoire la végétation ligneuse arbustive dont le contenu carbone n'a encore fait l'objet que d'études locales (exemple des pinèdes landaises : 0,57 tC/ha, Porté 2005).

Le stock de carbone « biomasse » de la forêt française s'élèverait ainsi à un total de l'ordre de 1,5 GtC (≈ 94 tC/ha).

Restent les compartiments « sols », c'est-à-dire la litière et le sous-sol hors racines, auxquels on attribue généralement, en France et ailleurs dans les forêts des régions tempérées, un contenu carbone au moins équivalent à celui de la biomasse ligneuse (Dupouey et coll. 2000, Lal 2005, Taverna et coll. 2007, Martin et coll. 2011). Selon Meersmans et coll. (2012) les sols forestiers français contiennent 95 tC/ha en moyenne soit environ 1,5 GtC au total. Le carbone du sol est réparti inégalement dans les différents horizons pédologiques, en décroissance quasi exponentielle en fonction de la profondeur. Selon Jonard et coll. (2017), on trouve, sur la centaine de sites d'observation du réseau « Rénécofor » (Réseau national de suivi à long terme des écosystèmes forestiers), 11,7 tC/ha en moyenne dans la litière, 69,2 tC/ha dans les premières couches du sol minéral (0-40 cm) dont 30,8 tC/ha pour la seule tranche 0-10cm, 99 tC/ha jusqu'à 1 mètre de profondeur, cette dernière valeur n'étant pas significativement différente de celle citée plus haut pour l'ensemble de la forêt française (95 tC/ha). Aussi, bien que les sites « Rénécofor » soient peu nombreux et se situent exclusivement en forêt publique, peut-on retenir ces chiffres comme indicatifs pour l'ensemble de la forêt française, jusqu'à plus ample informé. Plus précisément, la litière contiendrait plus de carbone sous résineux (moyenne de 17,6 tC/ha pour cinquante et un sites) que sous feuillus (moyenne de 5,7 tC/ha pour cinquante sites), le sol minéral étant moins nettement différencié : moyennes de 92 tC/ha sous résineux, 82,8 tC/ha sous feuillus, jusqu'à un mètre de profondeur, dont 31,4 tC/ha sous résineux et 30,1 tC/ha sous feuillus pour la seule tranche 0-10cm dont on verra plus loin l'importance dans le stockage de carbone. L'extrapolation à l'ensemble de la forêt de production, dont les peuplements à essence dominante résineuse ou feuillue couvrent respectivement 29 % et 71 % de la surface (Maaf et IGN 2016), conduit à un stock de carbone total non notablement différent de 1,5 GtC dont ≈145 MtC pour la litière et ≈485 MtC pour les premières couches 0-10 cm du sol minéral.

Malgré de possibles redondances dans l'inventaire, les frontières entre compartiments étant floues en réalité, le stock total de carbone Q_F dans la forêt française devrait ainsi approcher 3 gigatonnes (≈185 tC/ha). Sa répartition dans les différents compartiments est représentée sur la figure 2 avec les 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. Les chiffres indiqués entre parenthèses ne sont que des estimations fragiles, acceptables en ordre de grandeur.

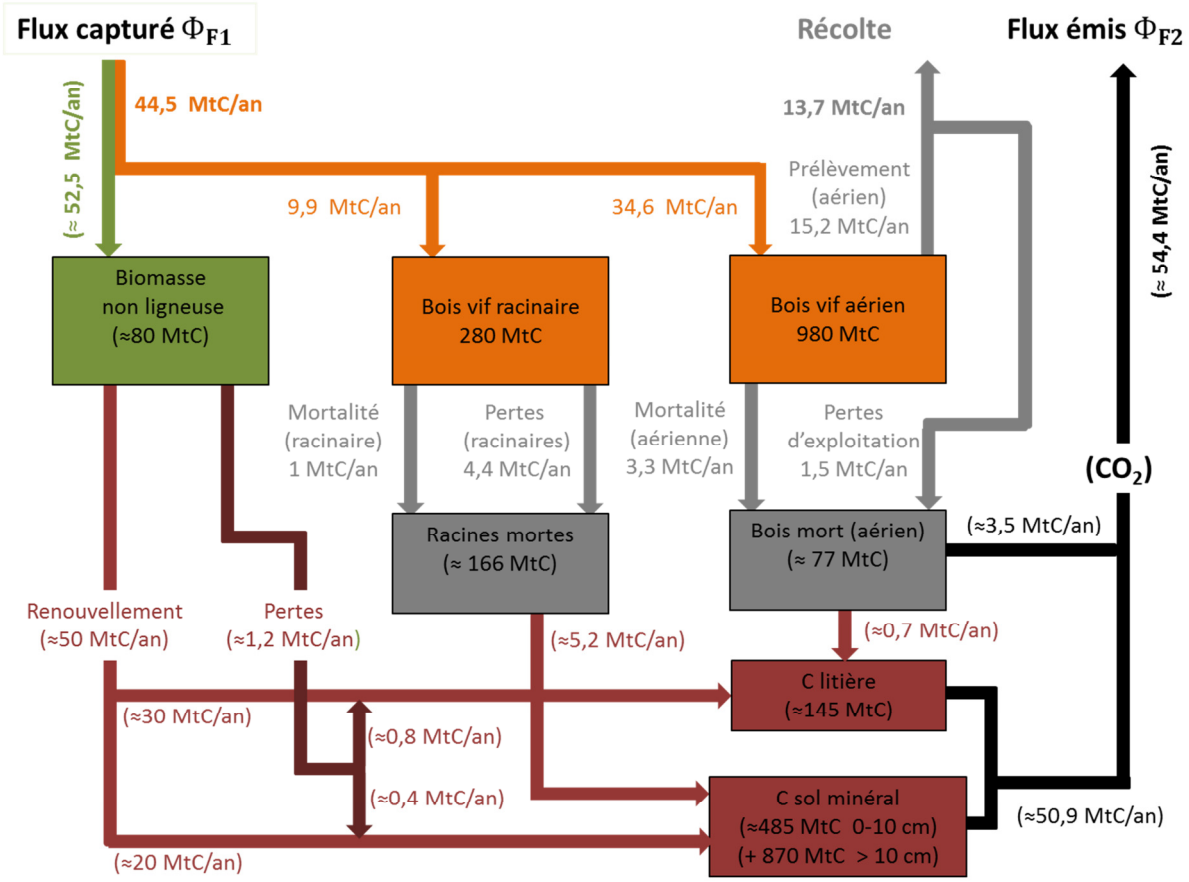


Figure 2 - Schéma simplifié des compartiments forestiers et des flux de carbone qui y transitent. (Valeurs approximatives des stocks et flux rapportables à l'année « moyenne » 2010)

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. Le flux Φ_{F1} correspond à la production primaire nette.

Le stock de carbone Q_P séquestré dans les produits bois est insuffisamment renseigné en raison de l'absence d'archives anciennes sur les productions durables, notamment pour la construction et l'ameublement, ainsi que d'informations statistiques fiables sur leur durée de vie et leur destinée au terme de leur utilisation (combustion, recyclage ou mise en décharge). Tiré d'une étude ponctuelle pour l'année 2005 (Deroubaix et coll. 2012), le chiffre de 94 MtC (344 $MtCO_2$) pour les produits bois en usage donne une indication d'ordre de grandeur : 100 MtC. À ce stock, il conviendrait d'ajouter celui des produits bois placés en décharge en fin de vie, stock probablement comparable ou supérieur à celui des produits en usage mais pour lequel on ne dispose d'aucune donnée sûre. Ce dernier compartiment est mentionné pour mémoire.

C-2-3 Flux de carbone forestiers

À l'exception des flux associés aux bois récoltés Φ_R (Φ_{R1} et Φ_{R2}), les flux ne sont pas directement mesurables et c'est par la variation des stocks dont ils dérivent qu'on peut les quantifier. Les flux

échangés entre les différents compartiments énumérés plus haut sont représentés par des flèches sur le schéma de la figure 2.

C-2-3-1 Flux de carbone « ligneux »

Les inventaires périodiques de l'IGN permettent de déterminer les « flux de bois fort tige » : production biologique annuelle, prélèvement, mortalité, par comparaison des stocks entre deux passages (IGN 2014) ; les valeurs retenues dans le tableau 2, rapportables à l'année 2010 choisie pour référence, sont des moyennes établies à partir des relevés des campagnes 2004 à 2012 pour la production (IGN 2014c), 2005 à 2013 pour le prélèvement (IGN 2014d), 2004 à 2013 pour la mortalité (IGN 2014e) et sont donc susceptibles de légères modifications lorsque seront intégrés les résultats des dernières campagnes. Ces chiffres n'incluent pas la mortalité exceptionnelle causée par la tempête Klaus de janvier 2009, non plus que les prélèvements effectués sur chablis en cette circonstance, et ils sont donc censés représenter l'évolution normale de la forêt française, hors événements accidentels majeurs. L'accroissement annuel figurant dans la dernière colonne correspond à la production biologique brute diminuée du prélèvement et de la mortalité. On respecte ici la terminologie de l'inventaire IFN ; en particulier, il importe de ne pas confondre « prélèvement » et « récolte » : après conversion en volumes réels, la récolte correspond à la seule part « aérienne » du prélèvement diminuée du volume des pertes d'exploitation, les racines des arbres exploités étant généralement laissées en place.

	Production brute	Prélèvement	Mortalité	Accroissement
Feuillus	54,2 ± 0,9	20,3 ± 1,4	5,3 ± 0,3	28,6
Résineux	36,3 ± 1,1	21,2 ± 1,9	3,4 ± 0,3	11,7
Total	90,5 ± 1,2	41,5 ± 2,3	8,7 ± 0,4	40,3

Volumes annuels « bois fort tige » (millions de mètres-cubes par an)

Tableau 2 - Répartition de la production biologique brute, pour les feuillus d'une part, pour les résineux d'autre part, entre prélèvement, mortalité et accroissement annuels (IGN 2014b, c, d, e)

Avec les facteurs de conversion du tableau 1, les données d'inventaire du tableau 2 peuvent être traduites en termes de volumes réels annuels, aérien et racinaire (millions de mètres-cubes par an), puis en contenu carbone (millions de tonnes par an) (tableau 3).

On détermine ainsi :

a) la part « ligneuse » du flux Φ_{F1} - La part du flux de carbone capté Φ_{F1} qui correspond à la production de matière ligneuse est de 44,5 millions de tonnes de carbone par an (44,5 MtC/an) soit, en moyenne par hectare, 2,8 tC/an. De ces 44,5 MtC/an, 34,6 MtC/an sont allouées aux troncs et branches des arbres et 9,9 MtC/an à la partie ligneuse des racines.

b) le flux de carbone lié à la mortalité et autres sources de bois mort - Le flux de carbone lié à la mortalité est de 4,3 MtC/an, dont 3,3 MtC/an pour la part aérienne qui alimente le compartiment « bois mort » et 1 MtC/an pour la part racinaire qui rejoint celui des « racines mortes ». Au flux de mortalité racinaire viennent s'ajouter 4,4 MtC/an correspondant aux racines des arbres exploités, qui restent généralement en place. Et au flux de mortalité aérienne se joint celui du bois abandonné au sol lors de l'exploitation ; aux pertes d'exploitation, estimées classiquement à 10% du volume aérien

prélevé soit 3,27×10^6 m^3/an pour les feuillus et 2,82×10^6 m^3/an pour les résineux, correspond un flux d'environ 1,5 MtC/an. Le total des flux de carbone alimentant les compartiments « bois mort (aérien) » et « racines mortes » est donc d'environ 10,2 MtC/an au total soit 0,64 tC/an en moyenne par hectare.

Flux annuels en....		volume aérien ×10^6 m^3/an	C ligneux aérien MtC/an	volume racinaire ×10^6 m^3/an	C ligneux racines MtC/an
Production	Feuillus	87,2	24	24,4	6,7
	Résineux	48,3	10,6	14,5	3,2
	Total F+R	135,5	**34,6**	38,9	**9,9**
Prélèvement	Feuillus	32,7	9	9,1	2,5
	Résineux	28,2	6,2	8,5	1,85
	Total F+R	60,9	**15,2**	17,6	**4,4**
Mortalité	Feuillus	8,5	2,3	2,4	0,65
	Résineux	4,5	1,0	1,3	0,3
	Total F+R	13,0	**3,3**	3,7	**1**
Accroissement	Feuillus	46,0	12,7	12,9	3,5
	Résineux	15,6	3,4	4,7	1,0
	Total F+R	61,6	16,1	17,6	4,5

Tableau 3 - Conversion des flux de bois fort tige du tableau 2 en flux annuels de volumes réels et de contenus carbone.

Les valeurs de flux inscrites en chiffres gras sont reportées sur le schéma 2 en regard des compartiments que ces flux alimentent.

c) le flux de carbone emporté par la récolte Φ_R – Au prélèvement aérien (32,7×10^6 m^3/an pour les feuillus et 28,2×10^6 m^3/an pour les résineux) est associé un flux de 15,2 MtC/an. Après déduction des pertes d'exploitation, estimées à 10 % en volume, la récolte se trouve constituée de 29,4×10^6 m^3/an (feuillus) et 25,4×10^6 m^3/an (résineux) soit 54,8×10^6 m^3/an au total. On est conduit à 13,7 MtC/an pour le flux de carbone Φ_R emporté par la récolte, soit 0,85 tC/an en moyenne par hectare.

C-2-3-2 Autres flux

Les données concernant les variations des stocks de carbone autres que celles 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.

Le support de réflexion est classique : 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 le flux annuel Φ_e entrant et le flux annuel Φ_s sortant ; il ne s'agit là que de la simple application du principe de conservation. De plus, dans une approximation linéaire au premier ordre, le flux sortant Φ_s peut être exprimé comme le rapport du stock Q au temps de transit τ du carbone dans le compartiment considéré (figure 3 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 3 b).

$$\Phi_e \rightarrow \boxed{\Delta Q/\Delta t} \rightarrow \Phi_s \approx Q/\tau$$

$$\Phi_e \rightarrow \boxed{dQ/dt} \rightarrow \Phi_s \approx Q/\tau$$

$$\Phi_e = \Delta Q/\Delta t + \Phi_s \approx \Delta Q/\Delta t + Q/\tau$$

(a)

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

(b)

Figure 3 - Représentation approchée linéaire au premier ordre de la dynamique d'un système obéissant à une loi de conservation.

Par ailleurs, la forêt française, considérée dans son ensemble, est un système dont l'évolution est lente et monotone. Ainsi, les volumes de bois sur pied, résineux aussi bien que feuillus, ont-ils crû, depuis plusieurs décennies, de manière quasi linéaire, plus précisément exponentielle à grande constante de temps, comme le montre la figure 4. La biomasse non ligneuse, principalement portée par les parties aérienne (feuillage) et souterraine (racines fines et mycorhizes) du bois vif, dont le renouvellement est une source importante de carbone pour la litière et le sol, a dû évoluer de manière similaire. Les taux de mortalité annuelle pour les feuillus et les résineux, rapportés aux volumes respectifs de bois sur pied, se situent, hors évènements extrêmes (tempêtes), dans une fourchette assez étroite de 0,2 à 0,4% toutes essences confondues (Map et IFN 2005, Maaf et IGN 2015) et les flux de carbone que cette mortalité naturelle dirige vers les compartiments « bois mort » et « racines mortes », ont donc une évolution semblable à celle du volume de bois vif. De leur côté, les volumes de bois annuellement récoltés, et par conséquent les pertes d'exploitation aérienne et racinaire, semblent être restés du même ordre de grandeur, depuis plusieurs décennies également (AGRESTE 2016, Map et IFN 2006, Maaf et IGN 2016). Le flux de carbone que reçoit, *in fine*, le compartiment « litière + sol » avant renvoi dans l'atmosphère sous forme de CO_2 est donc lui aussi d'évolution lente et monotone, obéissant depuis plusieurs décennies, à une même loi de variation.

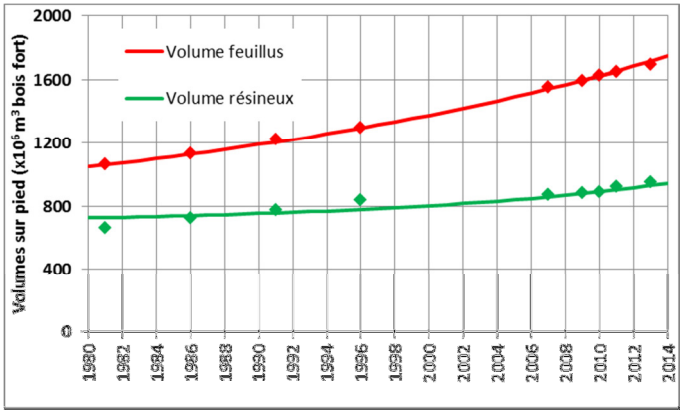


Figure 4 - Évolutions des volumes sur pied des bois feuillus et résineux (Maaf et IGN 2016, IGN 2014b, IGN 2016)

Les marqueurs représentent les volumes inventoriés selon l'ancienne et la nouvelle méthode, les tracés continus répondent aux expressions (1)

Ces remarques conduisent à supposer qu'en raison du long passé de la forêt française, le régime d'évolution des compartiments « bois mort », « racines mortes » et « litière + sol » est, selon la

terminologie en usage dans l'étude des systèmes linéaires, « permanent » ou « forcé » par les flux d'entrée correspondants. On trouvera dans l'appendice E la justification des quelques formules utilisées ci-après pour indiquer, sous cette hypothèse de forçage, des valeurs plausibles des stocks et flux de carbone relatifs aux compartiments autres que ceux de bois vif. Ces valeurs sont reportées entre parenthèses sur le schéma de la figure 2 pour signaler leur caractère hypothétique.

a) Compartiment « bois mort » – Les bois morts sur pied ou au sol ne sont inventoriés de manière systématique que depuis 2008 et seul un cinquième des points d'inventaire étant visité chaque année, ce n'est qu'au terme de la campagne 2017 que la variation moyenne du stock de carbone sur la période sera définitivement fixée. Des documents récents (Maaf et IGN 2016 ; Dhôte et coll. 2016) font pourtant état d'une probable augmentation de ce stock alors que l'agrégation des premiers résultats ne montre pas d'évolution significative : les campagnes d'inventaire 2008 à 2011 ont permis de noter 118×10^6 m^3 de bois mort sur pied et chablis et 260×10^6 m^3 de bois mort au sol (IGN 2012b), celles de 2011 à 2015 ont relevé 110×10^6 m^3 et 265×10^6 m^3 respectivement (IGN 2016). Mais les marges d'erreur sur ces chiffres sont importantes et laissent place au doute. Pour aller au-delà de ce constat, on doit se reporter au modèle simple de la figure 3. Le flux entrant est constitué principalement du carbone de la partie aérienne des bois morts sur pied ou chablis (3,3 MtC/an) augmenté de celui des pertes d'exploitation (1,5 MtC/an), soit 4,8 MtC/an; le flux sortant est donné par le rapport du stock de carbone dans le compartiment « bois mort » (44 + 33 = 77 MtC) à la durée de transit (ou de résidence) τ du carbone dans ce compartiment. En conséquence, le stock de carbone « bois mort » augmenterait ou diminuerait selon que la valeur de τ est plus grande ou plus petite que 77/4,8 ≈ 16 ans. On ne sait pas, pour la forêt française, comment se situe la valeur de τ par rapport à cette valeur critique de 16 ans. Des valeurs moyennes de 10 et 18 ans pour les demi-vies $t_{1/2}$ des bois mort au sol, correspondant à des valeurs respectives de 14,5 et 26 ans pour τ ($\tau = t_{1/2}/\ln 2$), estimées pour les feuillus et résineux dans les forêts tempérées de l'est des U.S.A. (Russell et coll. 2014), peuvent donner une idée d'ordre de grandeur mais ne permettent pas de conclure. Cependant, si on considère, comme cela est argumenté plus haut, que l'évolution du stock de carbone dans le compartiment « bois mort » est simplement forcée par les flux qui l'alimentent (régime permanent), il est possible d'avancer des chiffres pour le temps de transit τ et par conséquent pour le stockage.

Avec les réserves qu'imposent un changement de méthode d'inventaire en 2005 et l'impact de tempêtes majeures en 1999 (Lothar et Martin) et 2009 (Klaus), les évolution des volumes de bois fort tige feuillus V_F et résineux V_R représentées sur la figure 4 répondent aux équations suivantes :

$$V_F = 625 + 1000\exp(0{,}0286\,t) \qquad V_R = 690 + 200\exp(0{,}0587\,t) \qquad (1)$$

dont les paramètres sont en cohérence avec les données rapportées à l'année 2010 (volumes de 1625×10^6 m^3 et 890×10^6 m^3, accroissements de $28{,}6\times10^6$ m^3/an et $11{,}7\times10^6$ m^3/an respectivement pour les feuillus et les résineux). Les volumes sont exprimés en millions de mètres-cubes de bois fort tige. Le temps est compté en années, l'origine des temps ($t = 0$) correspondant à l'année 2010. Les taux de mortalité rapportés aux volumes de bois sur pied se situent depuis plusieurs décennies, selon les relevés IFN, dans des fourchettes assez étroites centrées sur 0,26 % pour les feuillus et 0,3 % pour les résineux, ces pourcentages étant cependant considérés, pour des raisons de méthode de dénombrement des arbres morts, comme sous-évalués (Map et IFN 2006). Pour cette raison, et pour rester en cohérence avec les données récentes, on retient les taux relevés lors des campagnes

d'inventaire recouvrant l'année 2010 choisie pour référence (IGN 2014e), soit ≈ 0,33 % pour les feuillus (mortalité 5,3x10^6 m^3/an) et ≈ 0,38 % pour les résineux (mortalité 3,4x10^6 m^3/an).

Dans ces conditions, les flux de carbone Φ_{eF} et Φ_{eR} transmis au compartiment «bois mort » par la mortalité des arbres feuillus et résineux sont eux-mêmes de la forme :

$$\Phi_{eF} = a_F + c_F \exp(\alpha_F t) \qquad \Phi_{eR} = a_R + c_R \exp(\alpha_R t) \tag{2}$$

avec pour valeurs de paramètres, compte tenu des rapports 0,78 et 0,77 entre le volume aérien et le volume total et des facteurs de conversion en contenus carbone 0,567 tC/m^3(bois fort tige) et 0,38 tC/m^3(bois fort tige) respectivement pour les feuillus et les résineux :

a_F = 0,90 MtC/an	c_F = 1,44 MtC/an	α_F = 0,0286 an^{-1}
a_R = 0,77 MtC/an	c_R = 0,22 MtC/an	α_R = 0,0587 an^{-1}

Il faut également compter le flux de carbone apporté par les pertes aériennes d'exploitation. Malgré l'artefact d'un changement de méthode d'inventaire en 2005, qui est venu rompre la continuité des données collectées, les prélèvements de bois en forêt paraissent avoir été relativement stables, au moins depuis le début des années 1980, de l'ordre de 40 à 50×10^6 m^3/an de bois fort tige (Map 1995; Map et IFN 2001; Map et IFN 2006; Maaf et IGN 2016), avec quelques exceptions pour récoltes exceptionnelles suivant les grandes tempêtes. Toujours pour des raisons de cohérence, on retient les chiffres moyens de prélèvement annuel sur la période 2005-2013 recouvrant l'année de référence 2010, soit 20,3×10^6 m^3/an pour les feuillus et 21,2×10^6 m^3/an pour les résineux (IGN 2014d, cf. tableau 2). On admet donc, avec un taux estimé de 10 % pour pertes sur les volumes aériens, que le flux Φ_{ex} lié à ces pertes aériennes est fixé à ≈1,5 MtC/an.

Le flux total entrant Φ_e a ainsi pour expression :

$$\Phi_e = a + c_F \exp(\alpha_F t) + c_R \exp(\alpha_R t) \tag{3}$$

avec $a = a_F + a_R + \Phi_{ex}$. Le stock de carbone $Q|_{2010}$ à l'origine des temps $t = 0$ dans le compartiment « bois mort » est alors donné, dans l'hypothèse de réponse forcée, par l'expression (cf. appendice E) :

$$Q|_{2010} = a\tau + \frac{c_F \tau}{1+\alpha_F \tau} + \frac{c_R \tau}{1+\alpha_R \tau} \tag{4}$$

où τ est le temps de transit (ou de résidence). Le stockage de carbone dans le compartiment à l'origine des temps a pour expression, dans les mêmes conditions :

$$dQ/dt|_{2010} = \frac{\alpha_F c_F \tau}{1+\alpha_F \tau} + \frac{\alpha_R c_R \tau}{1+\alpha_R \tau} \tag{5}$$

L'équation (4) établit une relation entre le stock et le temps de transit τ dans le compartiment. En acceptant la valeur $Q|_{2010}$ = 77 MtC avancée plus haut (section C-2-2), on détermine τ ≈ 18,1 ans, valeur dont le report dans l'expression (5) conduit à un stockage $dQ/dt|_{2010}$ de 0,6 MtC/an dans le compartiment « bois mort ». Cet accroissement du stock de carbone, de l'ordre de 0,8 % l'an en valeur relative, se trouve dans la marge d'incertitude entourant les résultats actuels d'inventaire et ne peut être confirmé (ou infirmé) que par comparaison des volumes de bois mort relevés sur une période beaucoup plus longue que celle qui est actuellement renseignée. Le temps de résidence trouvé (≈ 18,1 ans) est compatible avec des données de la littérature (cf. notamment Russell et coll.

2014). Il ne l'est pas, par contre, avec la demi-vie de 30 ans, soit une constante de temps τ de 43,3 ans, suggérée par l'INRA pour la dynamique de décomposition du bois mort (Dhôte et coll. 2016) ; celle-ci conduirait à un stockage beaucoup plus important, 2,8 MtC/an (10,3 $MtCO_2$/an) selon ces auteurs, stockage qui devrait être apparent dans les résultats d'inventaire récents, ce qui n'est pas le cas.

Le flux de carbone Φ_{bm} issu de la décomposition du bois mort, évalué par le rapport du stock (77 MtC) au temps de résidence (τ = 18,1 ans) s'élèverait, en 2010, à 4,2 millions de tonnes par an. La plus grande part de ce flux correspond à une émission directe de CO_2 dans l'atmosphère, la part restante étant incorporée à la matière organique de la litière. Si on se réfère à l'étude de Fahey et coll. (2005) sur une forêt expérimentale du New Hampshire (USA), le rapport des deux composantes du flux pourrait être de 5/1, soit 3,5 MtC/an pour la première (émise) et 0,7 MtC/an pour la seconde (transmise à la litière).

b) Compartiment « racines mortes » – Des considérations d'ordre de grandeur analogues pourraient être faites concernant le compartiment « racines mortes » si le stock actuel était connu. Ce n'est pas le cas. Cependant la relative stabilité des prélèvements sur une longue durée laisse supposer un quasi équilibre entre les flux d'apport et de décomposition racinaires pour les arbres exploités, avec 4,4 MtC/an pour valeur commune (cf. tableau 3). La constante de temps τ de dégradation des « grosses » racines (par opposition aux racines « fines ») étant, d'après les rares données de la littérature, de l'ordre de 25 ans à 40 ans, hors cas extrêmes, selon les essences, le sol et le climat (Garett et coll. 2006, Olajuyigbe et coll. 2011, Shorohova et Kapitsa 2016, ...), l'importance du stock de carbone racinaire des arbres exploités peut être confirmée entre 110 (4,4x25) et 176 MtC (4,4x40). De son côté, l'évolution du volume racinaire des arbres morts naturellement, peut être considérée comme forcée par celle de la mortalité, comme cela a été admis pour le volume aérien (hypothèse de permanence).

Un cheminement parallèle à celui qui a été suivi pour le compartiment bois mort conduit alors, à partir des expressions (1), avec les taux de mortalité retenus de 0,33 % pour les feuillus, 0,38 % pour les résineux, les coefficients respectifs 0,567 et 0,38 MtC/m^3 pour la conversion des volumes « bois fort » en contenus carbone et des rapports volume racinaire/volume total de 0,22 pour les feuillus et 0,23 pour les résineux, à des expressions similaires à (4) pour la relation entre stock et temps de résidence et (5) pour le stockage de carbone dans le compartiment, avec les valeurs de paramètres suivantes :

a_F = 0,25 MtC/an c_F = 0,40 MtC/an α_F = 0,0286 an^{-1}
a_R = 0,23 MtC/an c_R = 0,067 MtC/an α_R = 0,0587 an^{-1}

et Φ_{ex} = 4,4 MtC/an.

Pour des temps de transit (ou de résidence) τ qui se situent entre 25 et 40 ans, le stock total de carbone rapportable à l'année 2010 dans le compartiment « racines mortes » serait ainsi de 128 à 203 MtC, dont 109 à 175 MtC pour les racines des arbres exploités et par conséquent 19 à 28 MtC pour celles des arbres morts naturellement (dont 13 MtC déjà déterminées pour les racines des arbres morts sur pied et celles des chablis récents). Pour la suite de l'illustration, on retient la valeur médiane de la fourchette des temps de résidence, soit τ = 32,5 ans, ce qui conduit à ≈166 MtC pour le stock de carbone des racines mortes (23 MtC pour les racines des arbres morts naturellement et 143 MtC pour celles des arbres exploités) et ≈ 0,2 MtC/an pour le stockage dans le compartiment.

Le flux de carbone Φ_{rm} issu de la décomposition des racines mortes, évalué, comme précédemment, par le rapport du stock au temps de transit, s'élèverait ainsi, en 2010, à 5,1 millions de tonnes par an. On peut penser que ce flux alimente principalement le compartiment « sol minéral» en carbone organique, quoique la litière soit aussi pour partie concernée et que l'émission directe de CO_2 dans l'atmosphère puisse ne pas être négligeable : on ne dispose pas d'information suffisante sur ces points.

c) Compartiment « biomasse non ligneuse» – 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 mais le flux qui lui est associé est considérable en raison de la brièveté de la vie de ses constituants. En ce qui concerne la part aérienne, dont le stock est estimé à 55 MtC, le temps de renouvellement du feuillage est de l'ordre de un an (arbres à feuilles caduques) à quelques années (notamment arbres résineux) et il en est de même pour la plupart des espèces de la strate herbacée. La forêt française étant majoritairement caducifoliée, le flux de carbone transmis à la litière par ce renouvellement pourrait ainsi être de l'ordre de 30 MtC/an ; cette estimation correspond à un temps de renouvellement moyen de 1,8 ans. En ce qui concerne la part souterraine, dont le stock est évalué à 25 MtC/an, le renouvellement des racines fines et des mycéliums qui leur sont associés délivreraient au sol, en moyenne, de l'ordre de 0.9 $tCha^{-1}an^{-1}$ et 0,4 $tCha^{-1}an^{-1}$ respectivement (Brunner et Godbold 2007, Godbold et coll. 2006), soit environ 20 MtC/an pour l'ensemble de la forêt française, ce qui correspond à un temps moyen de renouvellement de 1,25 ans. Globalement, le compartiment « biomasse non ligneuse », avec un stock de 80 MtC, fournirait de l'ordre de 50 MtC/an à la litière et au sol minéral, ce qui correspond à un temps de résidence moyen de 1,6 ans. On peut considérer que cette biomasse, son contenu carbone et le flux délivré sont simplement proportionnels au volume de bois sur pied, ainsi que cela est admis pour d'autres compartiments comme ceux des branches et des racines vivantes. Pour un accroissement annuel du volume de bois sur pied de $40{,}3\times10^6$ m^3/an (valeur rapportée à l'année 2010, cf. tableau 2) soit 1,6 % l'an en valeur relative, le stockage de carbone dans la biomasse non ligneuse serait donc proche de 1,3 MtC/an.

Il convient de tenir compte, en outre, du transfert de biomasse non ligneuse à la litière et au sol lié à l'exploitation forestière. Le flux de carbone correspondant est proportionnel au prélèvement. En ne faisant pas de distinction, faute de donnée, entre essences feuillues et résineuses, c'est-à-dire en admettant le même coefficient de proportionnalité (80/1260) que celui qui lie globalement le stock de carbone de la biomasse non ligneuse à celui des arbres sur pied, ce flux s'élève à ≈ 1,2 MtC/an pour un prélèvement de 19,6 MtC/an (15,2 + 4,4 cf. tableau 3). Réparti proportionnellement aux stocks aérien (55 MtC) et souterrain (25 MtC), ce flux se partage en ≈ 0,8 MtC/an à destination préférentielle de la litière et ≈ 0,4 MtC/an à celle du sol minéral.

Pour rester arithmétiquement cohérent, on doit ajouter 52,5 MtC/an (50+1,3+1,2) à la part « ligneuse » (44,5 MtC/an) du flux Φ_{F1} capturé. L'estimation faite à grands traits, faute d'inventaire, de l'important flux de carbone lié au renouvellement de la biomasse non ligneuse est confortée par quelques recoupements. On peut noter que la productivité primaire nette Φ_{F1} de la forêt française (biomasse ligneuse et non ligneuse) se trouve chiffrée à 52,5 + 44,5 ≈ 97 MtC/an, soit ≈ 6 $tCha^{-1}an^{-1}$, valeur proche de la moyenne européenne de 5,2 ± 0,75 $tCha^{-1}an^{-1}$ avancée par Luyssaert et coll. (2010), et que la part de la biomasse non ligneuse (54 %) se trouve bien dans la fourchette 50 %-60 % proposée par ces mêmes auteurs. De plus, les valeurs du flux issu du compartiment « biomasse non

ligneuse » sont compatibles avec les observations de terrain concernant l'accumulation de carbone dans la litière et le sol minéral (cf. paragraphe suivant d).

d) Compartiment « litière + sol» – Avec les réserves que nécessitent des estimations qui ne reposent que sur des indications bien fragiles, la litière et le sol collecteraient un flux de carbone de 57,1 MtC/an composé, d'une part, du flux lié au renouvellement de la biomasse non ligneuse, évalué à 50 MtC/an et aux « pertes » de cette même biomasse liées à l'exploitation (1,2 MtC/an), d'autre part, des flux transmis par les compartiments « racines mortes » (5,2 MtC/an) et « bois mort aérien » (0,7 MtC/an). Le modèle de la figure 3 trouve ici ses limites : la matière organique se distribue de manière hétérogène entre la surface et la roche mère, avec des cinétiques d'oxydation très différentes selon la profondeur et il conviendrait de distinguer les horizons pédologiques en autant de compartiments échangeant et stockant du carbone. En ce qui concerne les forêts françaises, l'information est restreinte aux analyses de sol pratiquées en forêt publique sur la centaine de sites du réseau « Rénécofor » en 1993-1995 puis en 2007-2012 (Nicolas 2015, Jonard et coll. 2017). La conclusion principale est que le stock de carbone organique dans la litière et le sol minéral augmente en moyenne de 0,35 $tCha^{-1}an^{-1}$ sur les sites du réseau, 0,1 $tCha^{-1}an^{-1}$ dans la litière et 0,25 $tCha^{-1}an^{-1}$ dans le sol minéral, évolution plus marquée sous résineux (+0,49 $tCha^{-1}an^{-1}$) que sous feuillus (+0,20 $tCha^{-1}an^{-1}$). Une précision d'importance est que le stockage dans le sol minéral intéresse essentiellement les dix premiers centimètres comptés à partir de la surface, le contenu carbone des couches plus profondes ne variant que de manière comparativement négligeable.

De manière certes caricaturale, on peut ainsi distinguer, comme indiqué sur la figure 2, trois sous-compartiments : la litière, alimentée principalement en carbone par le renouvellement de la biomasse non ligneuse aérienne et une partie du flux de décomposition du bois mort, la couche 0-10cm du sol minéral, alimentée principalement par le renouvellement de la biomasse non ligneuse souterraine et la décomposition des grosses racines, et enfin les couches profondes dans lesquelles on peut négliger, comparativement, les variations de stock. En admettant que le stockage de carbone dans les sous-compartiments « litière » et « sol 0-10 cm » est forcé par les flux qui les alimentent, il devient possible d'estimer théoriquement les contributions correspondantes au stockage de carbone pour l'ensemble de la forêt française et de les situer par rapport aux relevés de terrain.

Les flux $\Phi_{\mathrm{bnl}}|_{\mathrm{litière}}$ et $\Phi_{\mathrm{bnl}}|_{\mathrm{sol}}$ issus du compartiment « biomasse non ligneuse » et alimentant en carbone la litière et le sol, respectivement, admis précédemment comme proportionnels au volume de bois sur pied, évoluent comme l'indiquent les relations :

$$\Phi_{\mathrm{bnl}}|_{\mathrm{litière}} = 30 * (\mathrm{V_F} + \mathrm{V_R})/2515 \qquad \Phi_{\mathrm{bnl}}|_{\mathrm{sol}} = 20 * (\mathrm{V_F} + \mathrm{V_R})/2515 \qquad (6)$$

où les volumes feuillus $\mathrm{V_F}$ et résineux $\mathrm{V_R}$ sont donnés par les expressions (1) ; le dénominateur 2515 représente, en millions de mètres cubes, le volume total de bois sur pied inventorié pour l'année 2010 ; les chiffres de 30 et 20 MtC/an sont ceux des flux de carbone alimentant la litière et le sol respectivement, estimés pour la même année. À ces flux s'ajoutent, en ce qui concerne la litière, un flux $\Phi_{\mathrm{bm}}|_{\mathrm{litière}}$ correspondant à une fraction approximative 1/6 du flux Φ_{bm} issu du compartiment « bois mort », et, en ce qui concerne le sol, le flux Φ_{rm} issu du compartiment racines mortes. Le calcul de ces flux s'effectue à partir de l'évolution des stocks sous hypothèse de forçage en divisant par le temps de transit correspondant. Pour être complet, on tient compte des flux de carbone associés à la biomasse non ligneuse des arbres exploités (feuillage, racines fines ...) quoique leur importance soit relativement faible (1,2 MtC/an pour un total de 57,1 MtC/an en 2010). Les

expressions de tous ces flux sont de même forme (3) que celle du flux Φ_e à l'entrée du compartiment « bois mort », et il en est de même, pour les flux totaux, avec les valeurs de paramètres :

a = 17,1 MtC/an	c_F = 12,1 MtC/an	α_F = 0,0286 an^{-1}
	c_R = 2,4 MtC/an	α_R = 0,0587 an^{-1}

pour ce qui concerne la litière, et :

a = 15,7 MtC/an	c_F = 8,2 MtC/an	α_F = 0,0286 an^{-1}
	c_R = 1,6 MtC/an	α_R = 0,0587 an^{-1}

pour le sol minéral.

Les expressions (4) et (5) pour les stocks et stockages initiaux (2010) s'appliquent par conséquent de la même manière. L'estimation de 145 MtC pour le stock de carbone « litière » de la forêt française, en 2010 (cf. section C-2-2) permet de déterminer, par l'équation (4), le temps de résidence correspondant : τ = 4,9 ans dont le report dans l'expression (5) conduit à un stockage de ≈ 2 MtC/an (0,13 $tCha^{-1}an^{-1}$). En procédant de même pour la couche superficielle 0-10 cm du sol minéral, dont le contenu carbone est estimé à 485 MtC, on est conduit à un temps de résidence τ = 22,7 ans et à un stockage de 4,1 MtC/an (0,26 tC ha^{-1} an^{-1}). Le stockage total dans le compartiment « litière+sol » serait ainsi de 6,2 MtC/an pour l'ensemble de la forêt française, soit 0,39 tC ha^{-1} an^{-1}, le stockage dans le sol profond étant négligé devant les accumulations de carbone comparativement beaucoup plus importantes dans la litière et la première couche 0-10 cm du sol minéral.

Ces résultats ne peuvent être directement comparés avec les moyennes des relevés opérés sur les sites « Rénécofor » (les sites « Rénécofor », outre le fait qu'ils sont exclusivement situés en forêt publique, sont en nombre égal sous résineux et sous feuillus alors que les peuplements à essence dominante résineuse ou feuillue couvrent respectivement 29 % et 71 % de la surface de la forêt française). Leur compatibilité avec ces moyennes (0,1 $tCha^{-1}an^{-1}$ pour la seule litière et 0,25 $tCha^{-1}an^{-1}$ pour le sol minéral, 0,35 $tCha^{-1}an^{-1}$ au total sur les sites du réseau,) est cependant évidente et est en faveur de la représentativité des relevés « Rénécofor » et de la validité de l'hypothèse de permanence.

Le flux de carbone rendu à l'atmosphère par la litière et le sol, sous forme de dioxyde essentiellement, serait ainsi de 57,1-6,2 = 50,9 MtC/an. À ce flux s'ajoute celui issu directement du compartiment « bois mort », estimé plus haut à 3,5 MtC/an En conséquence, le flux Φ_{F2} (respiration hétérotrophe) s'élèverait à 54,4 MtC/an (cf. figure 2).

C-2-4 Flux de carbone issus de la récolte

La récolte à laquelle est lié le flux Φ_R de 13,7 MtC/an comprend du bois pour l'énergie (flux Φ_{R1}) et du bois destiné aux filières d'œuvre et d'industrie (flux Φ_{R2}).

Selon AGRESTE (2015) la récolte commercialisée de bois d'œuvre et d'industrie s'établit, en moyenne sur la période 2008-2012, à $33{,}2\times10^6$ m^3/an, répartie en $9{,}9\times10^6$ m^3 de bois feuillus et $23{,}3\times10^6$ m^3 de bois résineux. Compte tenu des valeurs moyennes d'infra-densité retenues pour ces deux catégories et d'une même proportion massique de carbone, le flux Φ_{R2} entrant dans la filière des produits bois plus ou moins durables (du papier journal, durée de vie de quelques mois, aux

charpentes traditionnelles, siècle et au-delà) peut être estimé à ≈7,9 millions de tonnes de carbone par an (7,9 MtC/an).

Selon la même source (AGRESTE 2015), la récolte commercialisée de bois pour le chauffage et l'énergie, calculée en moyenne sur la même période 2008-2012 s'élèverait à 4,6 millions de mètres cubes par an, chiffre très inférieur à la consommation réelle car le bois de chauffage autoconsommé n'est pas pris en compte alors que les volumes concernés sont assurément considérables : ainsi, selon une étude de Solagro et coll. (2013), la consommation de bois pour le chauffage domestique, relativement stable d'année en année, s'élevait, en 2012, à 32 millions de mètres-cubes dont 63 % soit 20×10^6 m^3 extraits de la forêt (hors vergers, haies et alignements), ce qui confirme le résultat d'une étude plus ancienne (Andersen 1999 citée dans FCBA 2013) qui estimait à 21 $\times10^6$ m^3 la récolte annuelle de bois de feu en forêt. Aussi, par souci de cohérence, est-il préférable d'évaluer le flux de bois énergie par différence entre les volumes récoltés : $29{,}4\times10^6$ m^3/an (feuillus) et 25,4 $\times10^6$ m^3/an (résineux) et les volumes commercialisés de bois d'œuvre et d'industrie. La consommation directe de bois combustible devrait ainsi s'élever, en moyenne annuelle sur la période considérée, à 29,4 – 9,9 = $19{,}5\times10^6$ m^3 de bois feuillus et 25,4 – 23,3 = $2{,}1\times10^6 m^3$ de résineux, soit 21,6 millions de mètres-cubes par an au total, ce qui est plausible au regard des chiffres cités plus haut concernant ce poste. On est alors conduit à une valeur de flux Φ_{R1} de 5,8 millions de tonnes de carbone par an (5,8 MtC/an ou 21,4 $MtCO_2$/an).

Le flux Φ'_{R2} est attaché à la combustion ou à la décomposition des déchets de l'industrie du bois et des produits bois non recyclés en fin de vie. Il peut être évalué en retranchant du flux Φ_{R2} « entrant » dans la filière des produits bois, la variation annuelle du stock Q_P qui comprend le carbone des produits bois en usage et aussi celui des produits bois placés en décharge. Le but étant de quantifier le « puits » constitué par la forêt française et les filières d'utilisation de son bois, il conviendrait, en toute rigueur, de prendre en compte tous les produits issus de la récolte nationale, y compris ceux qui sont exportés, et seulement ceux-là. Les difficultés comptables sont évidentes et on considérera « par défaut » que le bilan import-export est nul, ce qui revient à dire que tout le bois récolté est supposé être utilisé et consommé en France. Les seules indications dont on dispose sont celles d'une étude ponctuelle pour l'année 2005 (Vial 2010) qui conclut à des variations de stocks de carbone issus de bois français d'environ 0,7 MtC pour les produits en utilisation et 0,2 MtC pour les produits mis en décharge, soit 0,9 MtC au total. En admettant, faute de mieux, que ces valeurs s'appliquent aux années récentes, le flux Φ'_{R2} serait ainsi de l'ordre de 7,9 (Φ_{R2}) – 0,9 = 7 MtC/an.

C-3 Puits de carbone forestier, puits de carbone total

Le tableau 4 récapitule les valeurs des flux repérés sur le schéma de la figure 1. Ces valeurs sont affectées de marges d'incertitude assurément larges mais, telles qu'elles ont été déterminées dans la section C-2, elles sont arithmétiquement cohérentes et permettent d'évaluer en ordre de grandeur le puits de carbone que représente la forêt même et le puits de carbone total qui inclut l'utilisation du bois récolté. Pour ne pas compliquer inutilement une argumentation qui s'attache aux principes, on se limitera aux valeurs « intrinsèques » de ces puits, en faisant abstraction des émissions « extrinsèques » qui sont liées aux opérations de sylviculture, d'exploitation forestière, de transport des bois, d'élaboration des produits, etc.

Flux de carbone (cf. figs 1 et 2)	Φ_{F1}	Φ_{F2}	$\Phi_{\mathbf{R}}$	$\Phi_{\mathbf{R1}}$	Φ_{R2}	$\Phi'_{\mathbf{R2}}$
Valeur approx. (MtC/an)	97	54,4	13,7	5,8	7,9	7

Tableau 4 - Flux principaux intervenant dans la détermination du puits de carbone forestier et du puits de carbone total (cf. figure 1). Valeurs approximatives rapportables à l'année 2010.

a) Puits de carbone proprement forestier

Le flux de carbone net échangé entre la forêt, d'une part, l'atmosphère et les filières d'utilisation de son bois, d'autre part, est la différence : $\Phi_{F1} - \Phi_{F2} - \Phi_{R}$ soit 28,9 millions de tonnes de carbone captées annuellement, d'après les valeurs indiquées dans le tableau 4 pour l'année 2010. Ce « puits » résulte du cumul des stockages de carbone dans les arbres vifs, 16,1 MtC/an pour la part aérienne, 4,5 MtC/an pour la part racinaire (cf. tableau 3 « Accroissements »), dans la biomasse non ligneuse (1,3 MtC/an), dans le bois mort (0,6 MtC/an), dans les racines mortes (0,2 MtC/an), dans la litière et le sol (6,2 MtC/an). Converti en masse de dioxyde de carbone, le puits proprement forestier s'élève, selon ces chiffres, à 106 $MtCO_2$/an.

Le stockage de carbone dans les arbres vifs est de 20,6 MtC/an au total, soit un emprunt à l'atmosphère de 75,5 $MtCO_2$/an. Cette valeur de « puits ligneux » est un peu plus élevée que celle avancée par l'IGN qui est de 68,7 $MtCO_2$/an pour l'année 2011 (Colin 2014) ou encore que les 70,3 $MtCO_2$/an estimés par l'INRA (Dhôte et coll. 2016). Les écarts proviennent principalement des coefficients utilisés pour la conversion des volumes de bois fort tige en masses de carbone : 0,52 tC/m^3 pour les feuillus, 0,32 tC/m^3 pour les résineux, selon l'INRA, par exemple. L'utilisation de ces dernières valeurs à la place de celles indiquées dans le tableau 1 ramènerait à 68,3 $MtCO_2$/an, selon le schéma de calcul adopté, la valeur de puits obtenue plus haut (75,5 $MtCO_2$/an). Il y a donc convergence en ce qui concerne le bois vif.

Les contributions au puits de carbone forestier des compartiments autres que ceux de bois vif sont de moindre importance (total de 8,3 MtC/an), ce qui atténue les conséquences de l'incertitude qui les entoure pour l'estimation du puits global. La plus critique de ces contributions est celle de la litière et du sol, estimée à 6,2 MtC/an, rendue crédible par les mesures opérées sur les sites du réseau « Rénécofor ». Dans le rapport INRA déjà cité (Dhôte et coll. 2016), les auteurs jugent que ces sites ne sont pas représentatifs de l'ensemble des forêts françaises mais, de manière quelque peu arbitraire, ne retiennent que le tiers de la valeur observée sur le réseau (soit ≈2 MtC/an ou 7,25 $MtCO_2$/an) alors que, par ailleurs, ils reconnaissent que les chiffres présentés par Rénécofor sont du même ordre de grandeur que ceux observés dans d'autres pays européens. Sans vouloir trancher, on peut avancer que les variations de stocks de carbone dans les divers compartiments, y compris celui du sol, doivent être en relation avec l'évolution générale de la forêt. Celle-ci s'accroissant actuellement de 1,6 % l'an en volume de bois sur pied, une augmentation de l'ordre de 6 MtC/an d'un stock estimé à 630 MtC dans la litière (145 MtC) et les premières couches du sol minéral (485 MtC), soit 0,95 %, peut paraître assez faible au contraire.

b) Puits total incluant l'utilisation des bois

Le bilan des flux relatifs aux bois récoltés s'ajoute naturellement à celui des flux proprement forestiers. Ce bilan se résume à la différence entre le flux Φ_R et la somme des flux $\Phi_{R1} + \Phi'_{R2}$ émis, d'une part, par les usages énergétiques directs, d'autre part, par la combustion ou la décomposition des déchets de l'industrie du bois et des produits bois en fin de vie ou obsolètes. Cette différence correspond à l'augmentation de la masse de carbone contenue dans les produits bois en usage ou placés en décharge, chiffrée à 0,9 MtC/an pour l'année 2005 (cf. section C-2-4), estimation conservée faute de mieux.

Le « puits » total serait donc de 29,8 millions de tonnes de carbone par an (109 $MtCO_2$/an), peu différent du puits de carbone strictement forestier.

c) Commentaires

Les valeurs obtenues pour le puits de carbone lié à la seule variation de la biomasse ligneuse vivante (20,6 MtC/an), pour le puits forestier compte tenu du stockage dans les compartiments autres que ceux de bois vif (28,9 MtC/an) et pour le puits total compte tenu du stockage de carbone dans les produits bois (29,8 MtC/an) appellent un certain nombre de remarques.

✓ La précision apparente des résultats ne doit pas faire illusion et ne résulte que du souci de préserver la cohérence arithmétique des calculs. Des marges d'incertitude importantes 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 évolutions indiquées pour les stocks de carbone dans les compartiments autres que ceux de bois vif sont largement hypothétiques. En ce qui concerne les produits bois, les chiffres ne sont que plausibles. Les valeurs de « puits » ne doivent donc être acceptées, pour le moment, que dans leur ordre de grandeur : elles pourront être affinées, suivant le même schéma de calcul, au fur et à mesure que les données d'inventaire seront plus complètes et les facteurs de conversion mieux connus.

✓ Pour l'année 2010, l'émission de CO_2 en France métropolitaine a été, selon le CITEPA (2014), de 376 mégatonnes hors secteur UTCF (utilisation des terres, leur changement et la forêt), auxquelles il convient de rajouter la part des terres non forestières dans le secteur UTCF, estimée à 19 $MtCO_2$, et surtout l'émission de combustion de la biomasse, affichée « hors bilan » selon les règles comptables issues du protocole de Kyoto, mais qui est physiquement objective et s'élève à 57 $MtCO_2$. Le total est de 452$MtCO_2$. Le puits de carbone proprement forestier, tel qu'on vient de le calculer (29,8 MtC ou 109 $MtCO_2$) compense près de 25 % de cette émission. La contribution de la forêt à la réduction des émissions nationales de CO_2 est donc loin d'être négligeable.

✓ Le stockage de carbone dans les produits bois ne représente, dans l'état actuel, qu'un faible pourcentage du puits total. Cela peut paraître justifier, en un sens, une des règles comptables ambiguës issues du protocole de Kyoto qui permet de considérer que le bois récolté est oxydé l'année même de sa coupe (IPCC 2006), mais qui, par son énoncé même, occulte le fait qu'un tel stockage, dans le bois façonné ou simplement conservé à l'état brut, pourrait être un puissant moyen de lutte contre l'effet de serre. Peut-être est-ce la raison pour laquelle, alors que les statistiques économiques et industrielles sont généralement très fouillées, on ne dispose pas de données fiables

concernant les stocks et flux de carbone liés aux produits forestiers. La valeur de 0,9 MtC/an attribuée au stockage de carbone dans les produits bois est rien moins qu'incertaine et, à notre connaissance, n'a pas été actualisée depuis qu'elle a été proposée (Vial 2010).

✓ Le puits de carbone forestier et le puits total compte tenu de l'utilisation des bois, calculés plus haut, sont « intrinsèques » dans le sens où ils ne sont attachés qu'au carbone forestier et ne prennent pas en compte les émissions « extrinsèques » qui sont liées aux opérations de sylviculture, à l'exploitation forestière, au transport des bois, à leur conditionnement (bois énergie), leur façonnage ou leur transformation (bois d'œuvre ou d'industrie), à leur commercialisation, leur mise à disposition au lieu d'utilisation, etc. L'évaluation de ces émissions entre dans le champ des analyses de cycle de vie, au-delà des objectifs de cette annexe. En ce qui concerne le flux $\Phi_{\mathbf{R1}}$ (bois énergie), on peut cependant indiquer que le total des émissions extrinsèques, c'est-à-dire la somme des émissions « amont » associées à la récolte, d'une part, et des émissions de combustion excédentaires (méthane, oxyde nitreux...) comptées en « équivalent CO_2 » (CO_{2eq}), d'autre part, est généralement considérée comme inférieure à 10 % de la valeur de ce flux (cf. annexe B, tableau 2). En ce qui concerne le flux $\Phi'_{\mathbf{R2}}$ (déchets de l'industrie du bois et fin de vie des produits), on ne dispose pas de donnée globale suffisamment sûre concernant les émissions additionnelles extrinsèques car les analyses de cycles de vie de produits bois représentatifs, sur lesquelles on devrait pouvoir s'appuyer, souffrent de graves défauts méthodologiques dont le principal est la non-comptabilisation des émissions de carbone d'origine « biomasse », alors qu'une part importante de l'énergie dépensée dans l'industrie du bois provient de la combustion de déchets ligneux. On revient sur ce point dans la section suivante.

C-4 Effets de substitutions

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. Ces adjonctions conduisent à une réévaluation du « puits » et peuvent indiquer des stratégies possibles, en matière de gestion forestière ou d'usage de la récolte, pour atténuer le changement climatique. Malheureusement, l'évaluation de ces effets de substitution repose le plus souvent sur des bases sommaires, parfois erronées ; l'assertion de « neutralité carbone» en est l'exemple flagrant, qui laisse penser que le remplacement des combustibles fossiles par du bois ou autre biomasse permet d'éviter les émissions de CO_2 dans la production de chaleur. Dans cette section, après un résumé des pratiques actuelles de réévaluation du puits de carbone, la substitution « énergétique » est reconsidérée à partir des caractéristiques physiques incontournables des différents combustibles. En ce qui concerne la substitution « matériau », on relève la fragilité de données issues d'analyses de cycle de vie non encore purgées d'imperfections d'ordre méthodologique parmi lesquelles, là encore, le recours au postulat abusif de neutralité carbone de la biomasse.

a) Réévaluation du puits de carbone

La pratique actuelle est d'estimer les réductions d'émission permises par les substitutions à l'aide de coefficients rapportant au mètre cube de bois utilisé la masse de CO_2 « évitée ». Par exemple, des coefficients de 0,5 tCO_2/m^3 pour l'utilisation du bois chauffage dans l'industrie et le secteur collectif

(ADEME 2015), de 0,4 tCO_2/m^3 pour le chauffage domestique (Maaf et IGN 2016), des coefficients moyens de 1,1 à 1,6 tonne de CO_2 évitée par mètre cube de produits bois (ADEME 2015, Dhôte et coll. 2016) ont été récemment proposés. Ainsi, en considérant qu'environ 75 % des 54,8 millions de mètres-cubes de bois récolté, soit 41×10^6 m^3/an, sont destinés à servir de combustible, directement (bois énergie) ou indirectement (valorisation énergétique des déchets de fabrication et des produits bois en fin de vie), la substitution énergétique conduirait à une réduction d'émission de l'ordre de 16 à 21 $MtCO_2$/an. De même, en admettant que 25 % de la récolte, soit un volume d'environ 14×10^6 m^3/an, se retrouve dans les produits bois finis, la substitution « matériau » se traduirait par une réduction d'émission de l'ordre de 15 à 22 $MtCO_2$/an. Le puits de carbone représenté par la forêt française et les utilisations de son bois se trouverait ainsi amélioré de 31 à 43 $MtCO_2$/an (entre ≈ 8,5 et ≈ 12 MtC/an). Avec des variantes dans les valeurs adoptées pour les coefficients et la répartition des récoltes, les estimations des auteurs sont relativement convergentes sur ce point : réduction des émissions par substitutions de l'ordre de 42 $MtCO_2$/an selon l'INRA (Dhôte et coll. 2016), de l'ordre de 34 $MtCO_2$/an selon le Maaf et l'IGN (2016). En cumulant l'accroissement du stock de carbone et les émissions évitées, le « puits » que représentent la forêt et l'utilisation de son bois se trouverait ainsi porté à 140 ou 150 $MtCO_2$/an.

b) Qu'en est-il, en réalité, de la substitution énergétique ?

L'évaluation du puits de carbone proprement forestier ne préjuge pas de la destinée de la récolte ligneuse. Cette récolte peut *a priori* être brûlée, dégradée ou conservée sous forme brute ou transformée. Si elle est conservée, en partie ou en tout, elle participe à l'accumulation de carbone et ajoute sa propre contribution à celle de la forêt. Si la récolte se dégrade ou sert de combustible, le puits forestier reste inchangé mais le puits de carbone total se trouve affaibli. Pour évaluer l'effet d'une substitution énergétique, il suffit donc de considérer le stock de carbone représenté par l'ensemble [bois récolté + combustible alternatif] : la masse de carbone échangée avec l'atmosphère équivalant à la variation de ce stock, l'effet de la substitution du bois au combustible fossile ou de la substitution inverse, se mesure par la différence entre le contenu carbone du combustible qui est conservé et le contenu carbone de celui qui est brûlé. On trouvera dans l'Annexe B le développement complet appuyant ce raisonnement.

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 5 - Bilan « carbone » intrinsèque de la substitution de bois à des combustibles fossiles
Le signe (-) affectant les valeurs de bilan souligne qu'il s'agit d'une augmentation d'émission
[Une tonne-équivalent-pétrole (tep) équivaut à 41,87 gigajoules]

C'est donc aux facteurs d'émission des différents combustibles, comparés à celui du bois, qu'il faut se référer pour évaluer l'effet de la substitution énergétique. Ces facteurs qui représentent la masse de carbone émise lors de la combustion rapportée à l'unité d'énergie produite, sont indiqués, pour des

combustibles types, dans le tableau 5 (celui-ci reproduit le tableau 1 de l'annexe B). Le facteur d'émission du bois étant le plus élevé, le bilan de substitution est négatif (troisième colonne) quel que soit le combustible fossile remplacé : la substitution de bois aux combustibles fossiles accroît les émissions de combustion au lieu de les réduire.

Cette conclusion, contraire à celle qui découle de l'assertion de « neutralité carbone », repose sur un principe intangible et des données physiques incontournables :

- principe de conservation, par lequel le bilan capture-émission des échanges de carbone du système [forêt-bois récolté] avec l'atmosphère correspond à la variation du stock de carbone de ce système ; ce principe s'applique aussi au système [forêt-bois-combustible fossile] pour l'analyse des effets de substitution.
- données physiques concernant la proportion massique de carbone et le pouvoir calorifique inférieur des combustibles. Le facteur d'émission est le rapport de ces deux quantités et c'est le bois qui a, de tous les combustibles, le facteur d'émission le plus élevé, à l'exception possible de la tourbe ou du lignite.

L'évaluation d'émissions « évitées » que l'on fait habituellement sur la base de la « neutralité carbone » ne tient compte ni du principe de conservation, ni des facteurs d'émission.

À titre d'exemple, le coefficient de 0,5 tonne de CO_2 évitée par mètre-cube de bois de chauffage utilisé dans l'industrie et le secteur collectif, avancé par l'ADEME (2015), a été calculé dans l'hypothèse d'une substitution à 15 % de fioul, 81 % de gaz, 0,4 % d'électricité, 0,4 % de GPL et 3 % de charbon, la combustion du bois étant supposée « neutre ». En négligeant les faibles parts de l'électricité et du GPL, en prenant 0,5 pour densité moyenne des bois feuillus et résineux secs, 18,5 MJ/kg ou 0,442 tep/t pour pouvoir calorifique inférieur du bois, et avec les facteurs d'émission indiqués dans le tableau 5, on obtient une tout autre valeur : –0,37 tCO_2/m^3, le signe (–) signifiant qu'il s'agit d'un surcroît d'émission. Il convient par ailleurs de souligner que par rapport à des sources d'énergie non carbonées, qu'elles soient renouvelables ou non, l'émission de CO_2 par combustion du bois doit être comptée pour ce qu'elle est physiquement, c'est-à-dire, rapportée à l'unité de volume, de l'ordre d'une tonne de CO_2 par mètre-cube.

Ces considérations, à elles seules, suffisent pour remettre en cause l'ensemble des politiques de développement des usages énergétiques de la biomasse (le problème se pose aussi bien pour les biocarburants que pour les biocombustibles, tous deux réputés d'usage neutre vis-à-vis de l'effet de serre).

c) Qu'en est-il de la substitution matériau ?

Dans ce cas, la variation de stock de carbone qu'implique la substitution d'un produit bois à un produit de même fonction réalisé avec d'autres matériaux ne joue que de manière accessoire. C'est bien davantage par la comparaison des énergies et émissions « grises » liées à l'ensemble du cycle de vie du produit bois et du produit concurrent que l'on peut juger du bien-fondé d'une substitution et évaluer son impact « effet de serre ». Il ne fait pas de doute que des produits bois peuvent avantageusement remplacer, dans le secteur de la construction notamment, des éléments réalisés avec des matériaux énergivores tels que le fer, l'acier, l'aluminium ou le béton. Le contraire est aussi possible, lorsque des produits bois sont en concurrence avec des produits plastiques par exemple. Les analyses de cycle de vie (ACV) devraient permettre, cas par cas, de déterminer l'avantage « effet de serre » d'une substitution, dans un sens ou dans l'autre. Mais comme cela a été évoqué plus haut

ces analyses reposent encore sur une distinction qui n'a pas lieu d'être entre émissions de carbone « fossile » et émissions de carbone « biogénique » : les premières sont comptabilisées, les secondes ne le sont pas, toujours en vertu de la « neutralité carbone de la biomasse », concept dont on vient d'illustrer, à propos de la substitution énergétique, le caractère trompeur. Or c'est précisément dans l'industrie du bois que les émissions de carbone « biogénique » sont en proportion les plus élevées car la ressource en coproduits ligneux valorisables comme combustible y est abondante : écorces, sciures, dosses, déchets de façonnage... Les coefficients globaux cités en a), qui rapportent au mètre cube de produits la réduction d'émission, toutes applications confondues, doivent être par conséquent revus et corrigés. L'usage qui est fait de ces coefficients pour réévaluer globalement le puits de carbone total est par ailleurs suspect car les effets des substitutions ne devraient être comptabilisés que si celles-ci sont effectivement réalisées ou, à tout le moins, réalisables.

d) Conclusion sur les effets de substitution

Les chiffrés cités en a), aussi bien pour les effets de substitution « matériau » que ceux de substitution « énergétique » sont illusoires et il en est de même des estimations qui en découlent pour le puits carbone global de la filière [forêt-bois]. Dans ce qui suit, ne sera donc plus considéré que le puits de carbone proprement forestier, augmenté du stockage de carbone hors forêt dans la matière ligneuse récoltée. Mais la conclusion principale est que, si l'on s'affranchit de l'assertion de « neutralité carbone », il n'y a pas lieu de développer les usages énergétiques du bois, bien au contraire. Les valeurs des facteurs d'émission du tableau 5 indiquent la marche à suivre : pour les besoins de chaleur, mieux vaut utiliser le charbon que le bois, le pétrole que le charbon, le gaz que le pétrole, et les sources d'énergie non carbonées que le gaz. Il est important de réaliser que le souci des années 1970 : promouvoir les énergies renouvelables pour économiser les ressources fossiles épuisables, a cédé la place à un souci plus grand encore : éviter une catastrophe climatique provoquée, pour une bonne part, par les émissions résultant de l'utilisation de sources d'énergies « carbonées ». Or, le bois utilisé comme combustible émet plus de carbone par unité d'énergie que n'importe qu'elle autre source, alors que s'il est conservé durablement, sous forme brute ou transformée, il est le moyen de séquestrer le carbone puisé dans l'atmosphère par l'activité photosynthétique de la forêt.

Références bibliographiques

AGRESTE (2015) Récolte de bois et production de sciages, SSP, Agreste : septembre 2015

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

AGRESTE (2016) Enquête annuelle de branche exploitation forestière. Récolte de bois en France métropolitaine de 2005 à 2015. Septembre 2016.

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

Brunner I, Godbold D (2007) Tree roots in a changing world. Journal of Forest Research, vol. 12, Issue 2, pp. 78-82

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

CITEPA (2014) Inventaire des émissions de polluants atmosphériques et de gaz à effet de serre en France – Format SECTEN © CITEPA 2014

Colin A (2014) Emissions et absorptions de gaz à effet de serre liées au secteur forestier dans le contexte d'un accroissement possible de la récolte aux horizons 2020 et 2030. Convention MEDDE.DGEC / IGN n°2200682886 (IGN n°10998), Rapport final, mars 2014, IGN

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

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

Dupouey J-L, Pignard G, Badeau V, Thimonier A, Dhôte J-F, Nepveu G, Bergès L, Augusto L, Belkacem S, Nys C (2000) Stocks et Flux de carbone dans les forêts françaises. Rev For Fr (Nancy) LII : 139-154

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

Dupouey J-L, Pignard G, Hamza N, Dhôte J-F (2010) Estimating carbon stocks and fluxes in forest biomass : Application to the French case based upon National Forest Inventory data *in* : Loustau D (ed.), « Forests, carbon cycle and climate change », Chapter 5 : 101-129 , Quae, Versailles, 2010

Fahey T J , Siccama T G, Driscoll C T, Likens G E, Campbell J, Johnson C E, Battles J J, Aber J D, Cole J J, Fisk M C, Groffman P M, Hamburg S P, Holmes R T, Schwarz P A, Yanai R D (2005) The biogeochemistry of carbon at Hubbard Brook. Biogeochemistry 75 : 109-176

FCBA (2013) Mémento 2013

Garbaye J (2006) Qu'est -ce qu'une racine ? *in* Les racines, face cachée des arbres, Christophe Drénou coordinateur, Institut pour le développement forestier, 2006

Garrett L, Davis M, Oliver G (2007) Decomposition of coarse woody debris and methods for determining decay rates. New Zealand Journal of Forestry Science 37(2): 227–240 (2007)

Godbold D L, Hoosbeek M R, Lukac M, Francesca Cotrufo M, Janssens I A, Ceulemans R, Polle A, Velthorst E J, Scarascia-Mugnozza G, De Angelis P, Miglietta F, Peressotti A (2006) Mycorrhizal hyphal turnover as a dominant process for carbon input into soil organic matter. Plant and Soil (2006) 281:15–24

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

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

IGN (2012a) Le bois mort, l'iF, supplément d'IGN magazine sur l'information forestière, n°29, mai/juin 2012

IGN (2012b) La forêt en chiffres et en cartes, © IGN 2012

IGN (2013) Inventaire forestier, le Mémento, La forêt en chiffres et en cartes. © IGN 2013

IGN (2014) Résultats d'inventaire forestier. Méthodologie. Les résultats des campagnes d'inventaire 2009 à 2013, © IGN 2014

IGN (2014a) Les données de l'inventaire forestier : état des lieux et évolution, l'iF, n°34, novembre 2014

IGN (2014b) Inventaire forestier, le Mémento, La forêt en chiffres et en cartes. © IGN 2014

IGN (2014c) La production annuelle en volume. Service de l'inventaire forestier statistique. © IGN 2014

IGN (2014d) Les prélèvements de bois en forêt. Service de l'inventaire forestier statistique. © IGN 2014

IGN (2014e) La mortalité. Service de l'inventaire forestier statistique. © IGN 2014

IGN (2016) Inventaire forestier, le Mémento, La forêt en chiffres et en cartes. © IGN 2016

IPCC (2006) Eggleston H S, Buendia L, Miwa K, Ngara T and Tanabe K (eds) 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Published : IGES, Japan. Chapter 4, Forestland)

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

Jonard M, Nicolas M, Coomes D A, Caignet I, Saenger A, Ponette Q (2017) Forest soils in France are sequestering substantial amounts of carbon. Science of the Total Environment 574 (2017) 616–628

Lal R (2005) Forest soils and carbon sequestration. Forest Ecology and Management 220 : 242–258

Luyssaert S, Schulze E D, Börner A, Knohl A, Hessenmöller D, Law B E, Ciais Ph, Grace J (2008) Old-growth forests as global carbon sinks. Nature, Vol 455, 213-215, 11 September 2008

Maaf et IGN (2016) Indicateurs de gestion durable des forêts françaises métropolitaines, édition 2015

Map (1995) Les indicateurs de gestion durable des forêts françaises.

Map et IFN (2001) Les indicateurs de gestion durable des forêts françaises, édition 2000

Map et IFN (2006) Les indicateurs de gestion durable des forêts françaises, édition 2005

Martin M P, Wattenbach M, Smith P, Meersmans J, Jolivet C, Boulonne L, Arrouays D (2011) Spatial distribution of soil organic carbon stocks in France, Biogeosciences, 8, 1053–1065, 2011

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

Nicolas M (2015) RENECOFOR – Bilan technique de l'année 2014. Éditeur : Office national des forêts, Direction forêts et risques naturels.

Olajuyigbe S O, Tobin B, Gardiner P, Nieuwenhuis M (2011) Stocks and decay dynamics of above- and belowground coarse woody debris in managed Sitka spruce forests in Ireland. Forest Ecology and Management 262 (2011) 1109–1118.

Porté A, Dulhoste R, Lopez S, Bosc A, Meredieu C, Teissier du Cros R, Trichet P, Bernier F, Loustau D (2005) Détermination de la biomasse aérienne du sous-bois de peuplements adultes de Pin maritime : contribution à la quantification des stocks de carbone forestier à l'aide d'indicateurs de couvert. VIIIème Colloque ARBORA « Carbone, Forêt, Bois », Bordeaux, 01 & 02 décembre 2005

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

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

Shorohova E, Kapitsa E (2016) The decomposition rate of non-stem components of coarse woody debris (CWD) in European boreal forests mainly depends on site moisture and tree species. European Journal of Forest Research, 135(3) April 2016

Solagro, Biomasse Normandie, BVA et Marketing freelance (2013) Étude sur le chauffage domestique au bois, marchés et approvisionnement, synthèse, Coordination technique : Jean-Christophe Pouet et Alice Gauthier.

Vial E (2010) Comptabilisation du carbone dans les produits bois en France, Copyright FCBA INFO, Décembre 2010

Taverna R, Hofer P, Werner F, Kaufmann E, Thürig E (2007) The CO2 Effects of the Swiss Forestry and Timber Industry. Scenarios of future potential for climate-change mitigation. Environmental studies no. 0739. Federal Office for the Environment, Bern 2007

ANNEXE D : Scénarios d'évolution

« Le vrai est trop simple, il faut y arriver toujours par le compliqué »
(George Sand)

La forêt et l'utilisation des bois offrent des moyens d'action pour capter le carbone atmosphérique et atténuer l'effet de serre. 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 ; c'est donc le stockage de carbone qu'il faut maximiser sur une durée compatible avec les échéances climatiques. Les raisonnements sont facilités en considérant la forêt d'une part, les utilisations de son bois d'autre part, comme deux systèmes couplés par la récolte, conception qui est implicite dans l'évaluation qui a été faite du puits de carbone forestier de la forêt française métropolitaine (Annexe C) mais qui reste à formaliser. Pour dégager clairement les options possibles, on se limite à une description en première approximation des deux systèmes : puits de carbone forestier d'une part, stockage de matière ligneuse hors forêt d'autre part. Comme conséquence du principe de conservation, la dynamique du carbone forestier est essentiellement linéaire, du premier ordre et invariante sous réserve que le taux de mortalité en volume des arbres et autres temps caractéristiques restent constants. Dans ces conditions, les variations des stocks et flux de carbone forestier peuvent être décrites et comprises à la lumière des propriétés générales des systèmes linéaires invariants. Il est alors 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. Pour l'illustration, on prend l'exemple de la forêt française métropolitaine, raisonnablement documenté à partir des inventaires forestiers de l'IGN (cf. annexe C). Notamment, les scénarios calqués sur le développement prévu de l'utilisation du bois énergie (Plan d'action national en faveur des énergies renouvelables, loi de 2015 relative à la transition énergétique pour une croissance verte,...) montrent, s'il en était encore besoin, le caractère contre-productif de la substitution énergétique dans une perspective d'atténuation du changement climatique. Au contraire, si sont respectés les engagements de réduction des émissions fossiles (« facteur 4 », MEDDE 2013) et sous réserve de ne pas augmenter inconsidérément les prélèvements, le stockage de carbone par la forêt et l'utilisation judicieuse des bois permettraient, sauf évènements accidentels majeurs, de compenser totalement les émissions nationales avant même le milieu du siècle (2050). L'idéal serait la suppression pure et simple de l'usage des combustibles carbonés, au premier rang desquels le bois qui devrait, par contre, être conservé en même temps que le carbone qu'il contient.

D-1 Un modèle simple d'évolution des stocks et flux de carbone forestier

Le schéma de la figure 1 (cf. figure 2 de l'annexe C) et la représentation de la figure 2 (ou figure 3 de l'annexe C) 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. Ce cadre suppose que les constantes de temps caractéristiques des différents compartiments (temps de transit, de résidence ou de renouvellement) sont indépendantes des stocks de carbone et de la variable temporelle, ce qui fixe implicitement les limites d'utilisation du modèle.

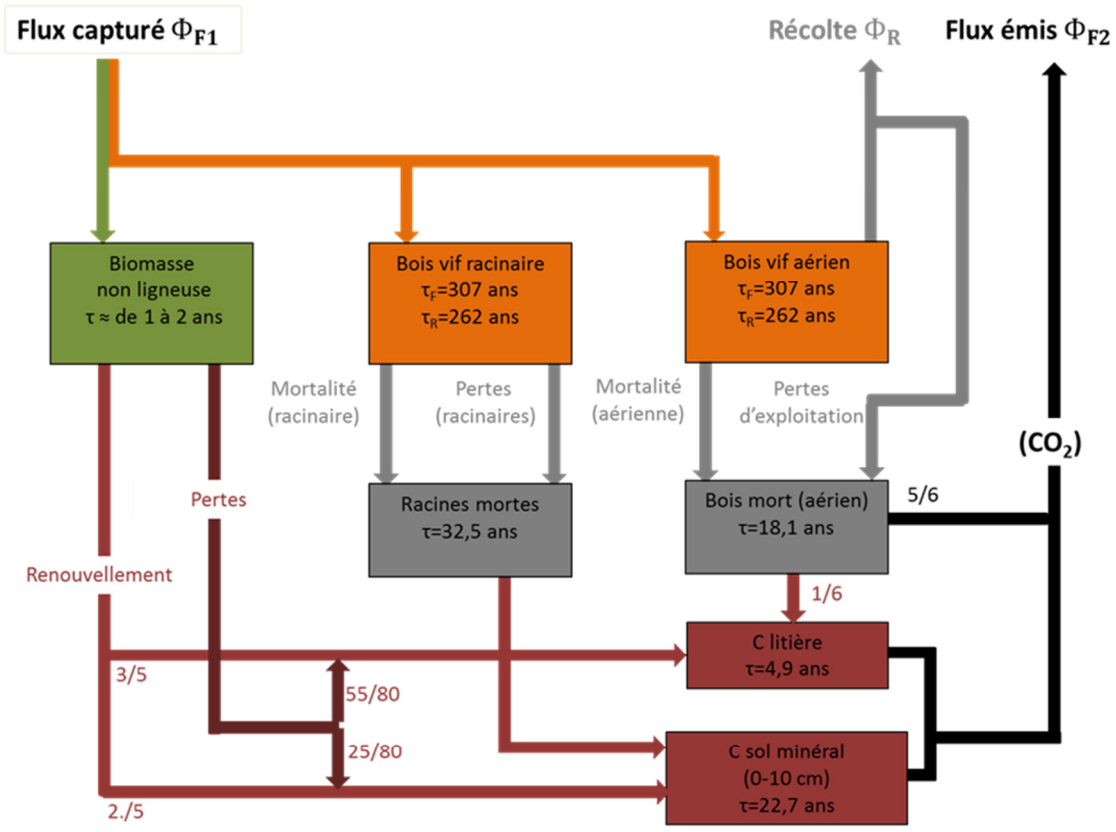


Figure 1 - Schéma simplifié des compartiments forestiers et des flux de carbone qui y transitent.

Les valeurs indiquées pour les temps τ de résidence ou de renouvellement ainsi que pour les répartitions de flux sont utilisées, dans ce qui suit, à des 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).

Pour le bois vif, on distingue les essences feuillues (indice F) et résineuses (indice R).

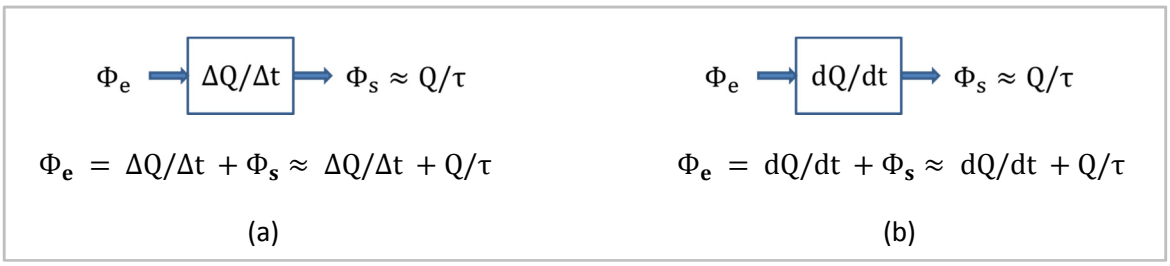


Figure 2 - Représentation approchée, linéaire du premier ordre, de la dynamique du carbone dans chaque compartiment.

Q : stock de carbone ; τ constante de temps caractéristique ; Φ_e flux entrant ; Φ_s flux sortant.

Ce modèle est applicable quel que soit l'étendue de la forêt considérée, de la simple parcelle au domaine forestier d'un pays tout entier, avec des valeurs de paramètres adaptés cas par cas. Dans cette annexe, le support d'illustration est la forêt française dans son ensemble et les temps caractéristiques et autres paramètres reportés sur la figure sont ceux déterminés dans l'annexe C.

a) Contribution du bois vif

La loi de conservation (Lavoisier) qui est à la base de la représentation de la figure 2 s'applique aux compartiments de bois vif aussi bien qu'aux autres compartiments. Ainsi, les données d'inventaire de l'IGN pour la forêt de production française qui figurent dans le tableau 2 de l'annexe C et portent sur les volumes ligneux, sont bien telles que, annuellement :

Accroissement = Production biologique – Mortalité – Prélèvement (1)

Ce bilan vaut aussi bien pour les feuillus que pour les résineux ou l'ensemble des deux catégories d'essences. C'est à cet accroissement que la contribution du bois vif au puits de carbone forestier est directement liée.

Soient V le volume de bois « fort tige » sur pied, G la production biologique, P le prélèvement et M la mortalité. En matière forestière, les flux G, P et M sont définis sur un « pas de temps » $\Delta\mathrm{t}$ d'une année et les valeurs pertinentes du volume V sont celles qu'on relève annuellement, en fin de végétation. En affectant l'indice i aux symboles des différentes grandeurs relatives à l'année i, l'équation de conservation (1) peut être explicitée sous la forme :

$$\mathrm{V}_i - \mathrm{V}_{i-1} = (\mathrm{G}_i - \mathrm{P}_i - \mathrm{M}_i) \times \Delta\mathrm{t} \qquad \Delta\mathrm{t} = 1 \text{ an} \qquad (2)$$

Ce formalisme, « discret » de par la nature des grandeurs traitées, est commode pour simuler numériquement l'évolution de la biomasse ligneuse mais n'aide pas la compréhension. Cependant, si on envisage cette évolution sur de nombreuses années, il est possible d'approcher l'équation (2) par une représentation continue dans laquelle on confond la variable discrète « année i » avec le « temps t », l'intervalle de temps $\Delta\mathrm{t}$ d'une année étant assimilé à l'élément différentiel dt. Les différentes grandeurs V, G, P et M étant alors considérées comme des fonctions continues du temps, il est possible de poursuivre analytiquement. On pose ainsi, en correspondance de l'équation (2) :

$$\mathrm{dV/dt} = \mathrm{G(t)} - \mathrm{P(t)} - \mathrm{M(t)} \qquad (3)$$

Le flux M de mortalité annuelle est d'autant plus grand que le volume V de bois sur pied est important. En première analyse, on peut admettre une simple proportionnalité, comme cela a été le cas dans l'estimation des flux de carbone forestier (section 2-3-2 de l'annexe C). En désignant par $1/\tau$ le coefficient de proportionnalité approximative de M à V, τ ayant la dimension d'un temps, l'équation (3) peut être récrite sous la forme :

$$\mathrm{dV/dt} + \mathrm{V}/\tau = \mathrm{G(t)} - \mathrm{P(t)} \qquad (4)$$

C'est une équation différentielle classique qui fait apparaître le domaine forestier considéré, du point de vue du volume ligneux, comme un système linéaire du premier ordre à paramètres constants, soumis à une excitation $[\mathrm{G(t)} - \mathrm{P(t)}]$ qui est la différence entre production biologique ligneuse et prélèvement annuels. La réponse du système est la variation du volume V de bois sur pied et, par

conséquent, celle de la biomasse et de son contenu carbone. La solution de l'équation (4) est la suivante, quelles que soient les fonctions $G(t)$ et $P(t)$:

$$V(t) = \left\{V_0 + \int_0^t [G(t') - P(t')]\exp(t'/\tau)dt'\right\}\exp(-t/\tau) \quad (5)$$

où V_0 représente le volume ligneux au temps $t = 0$ choisi pour origine. Le paramètre τ joue donc le rôle de constante de temps dans l'évolution du système et, inverse du taux de mortalité en volume, correspond au temps de renouvellement naturel de la matière ligneuse.

L'accroissement dV/dt du volume de bois sur pied à partir duquel peut être évaluée la contribution du bois vif au puits de carbone forestier est évidemment donné, d'après (4), par :

$$dV/dt = G(t) - P(t) - V(t)/\tau \quad (6)$$

La solution (5) doit être différenciée pour les peuplements feuillus et les peuplements résineux, en cohérence avec le niveau de détail adopté dans la section 2 de l'annexe C pour la description des stocks et flux de carbone. Le volume total s'obtient par simple sommation des résultats partiels obtenus pour les peuplements feuillus et résineux. Par contre, l'évaluation des stocks de carbone et celle de la contribution de la biomasse ligneuse au « puits » forestier nécessitent l'application aux volumes et accroissements annuels « bois fort tige », avant sommation, des facteurs de conversion en contenus carbone : 0,567 tC/m^3(bois fort tige) pour les feuillus et 0,38 tC/m^3(bois fort tige) pour les résineux. De même, pour séparer les contributions du « bois vif aérien » et du « bois vif racinaire » il faut faire appel aux facteurs d'expansion du tableau 1 de l'annexe C qui conduisent, pour les feuillus et les résineux, à des rapports respectifs 0,78 et 0,77 entre masses de carbone aérienne et totale, 0,22 et 0,23 entre masses de carbone racinaire et totale. Dans ces conditions, la représentation de la figure 2 s'applique sans restriction aux compartiments de « bois vif ».

b) Contributions des compartiments autres que ceux de bois vif

La dynamique des compartiments autres que le bois vif est également régie par la loi de conservation mais, en raison d'une composition différente de la biomasse ou de la dégradation progressive de cette dernière, la variable pertinente est le contenu carbone Q, non le volume. Le modèle de la figure 2 est alors directement applicable dans le cadre d'approximation choisi. En adoptant le formalisme continu (figure 2 b) compatible avec celui de l'équation (4), l'évolution du stock de carbone est décrite par l'équation :

$$dQ/dt + Q/\tau = \Phi_e(t) \quad (7)$$

avec la condition initiale $Q = Q_0$ pour $t = 0$; $\Phi_e(t)$ représente le flux entrant et τ le temps moyen de transit (ou de résidence ou de renouvellement) dans le compartiment considéré et le flux sortant est donné par le rapport :

$$\Phi_s(t) \approx Q(t)/\tau \quad (8)$$

Dans l'annexe C, l'estimation qui est faite, pour l'année de référence 2010, des contributions au puits de carbone forestier de plusieurs compartiments échappant encore aux inventaires forestiers est appuyée sur la solution particulière de l'équation (7) avec second membre, correspondant au régime forcé (ou permanent). Le déroulement de scénarios nécessite, bien entendu, la solution complète ; celle-ci a même forme que la solution de l'équation (4) et s'écrit :

$$Q(t) = \left\{Q_0 + \int_0^t \Phi_e(t')\exp(t'/\tau)\,dt'\right\}\exp(-t/\tau) \qquad (9)$$

On en déduit la contribution dQ/dt au puits de carbone forestier par :

$$dQ/dt = \Phi_e(t) - Q(t)/\tau \qquad (10)$$

Le lecteur trouvera dans l'appendice E les solutions (9) et (10) explicitées pour quelques fonctions $\Phi_e(t)$ simples.

c) Mise en œuvre

Dans le cadre d'approximation choisi, chacun des compartiments forestiers représentés dans le schéma-bloc de la figure 1, présente une dynamique du premier ordre de constante de temps τ (durée de vie, temps de transit, de résidence ou de renouvellement). Le flux reçu par chacun de ces compartiments provient de celui qui le précède et le flux sortant alimente le compartiment suivant en une cascade unidirectionnelle, en sorte que le calcul de la variation dans le temps du stock de carbone Q dans chaque compartiment à partir d'une condition initiale donnée est totalement explicite par une solution du type (5) ou (9). Lorsqu'un compartiment est alimenté par plusieurs flux, la linéarité du système permet d'obtenir la solution par superposition des variations 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 logiciel de calcul simple (fichier tableur) a été utilisé pour le déroulement des scénarios ci-après.

Sur le schéma de la figure 1 est reportée, pour chaque compartiment, la valeur de la constante de temps qui le caractérise. Pour les compartiments autres que ceux de bois vif, on a retenu les estimations faites dans la section 2-3-2 de l'annexe C. En ce qui concerne les compartiments de bois vif, les données d'inventaire portant sur les volumes sur pied (section 2-2 de l'annexe C) et la mortalité annuelle (tableau 2 de l'annexe C) conduisent à des valeurs τ_F = 307 ans pour les bois feuillus et τ_R = 262 ans pour les bois résineux, beaucoup plus grandes que celles caractérisant les autres compartiments (sol profond excepté). Pour le compartiment « biomasse non ligneuse » dans lequel le temps de renouvellement du carbone est court comparativement aux temps τ des autres compartiments, à défaut de connaître la répartition de cette biomasse et des flux qui lui sont liés entre feuillus et résineux, on conserve la formulation simplifiée introduite dans la section 2-3-2-c de l'annexe C : on admet que le stock varie proportionnellement à celui du bois vif avec un coefficient de proportionnalité 80/(280+980) = 80/1260 qui est le rapport des contenus carbone, et le flux sortant est supposé partagé en proportions 3/5 (renouvellement du feuillage et de la strate herbacée) et 2/5 (renouvellement des racines fines et des mycéliums) à destination de la litière et du sol minéral respectivement. On tient compte en outre du flux de carbone lié à la biomasse non ligneuse des arbres exploités, réparti en proportion des parts aérienne et souterraine dans cette biomasse : 55/80 à destination de la litière, 25/80 à celle du sol minéral. En ce qui concerne le sol minéral, on admet que le stock de carbone dans les couches profondes (> 10 cm) ne varie pas sensiblement comparativement aux couches superficielles (0-10cm). Enfin, pour le flux de carbone issu du compartiment bois mort, on conserve la répartition 5/6 pour l'émission directe dans l'atmosphère, 1/6 pour la transmission à la litière, comme cela a été admis, en l'absence de données fiables, dans la section 2-3-2 a de l'annexe C. Ces rapports ne prétendent pas à l'exactitude et ne sont

que plausibles ; ils permettent cependant des estimations d'ordre de grandeur et l'illustration de la dynamique du carbone forestier.

Les fonctions $G(t)$ (production biologique) et $P(t)$ (prélèvement) qui jouent le rôle d'excitation pour l'ensemble du système, ainsi que les conditions initiales, sont à préciser cas par cas. Il convient de rappeler que, dans la terminologie des inventaires forestiers, la production biologique G et le prélèvement P sont entendus sur une base annuelle, restreints à la biomasse ligneuse, et exprimés en volume « bois fort tige ». Notamment, on ne doit pas confondre volume récolté et prélevé : en volumes réels, la récolte correspond à la seule part « aérienne » du prélèvement diminuée du volume des pertes « aériennes » d'exploitation (estimées ici à 10% de ce prélèvement aérien) ; les pertes totales comprennent ces pertes « aériennes », les racines des arbres exploités qui sont généralement laissées en place et la biomasse non ligneuse de ces mêmes arbres exploités (feuillage et racines fines principalement). La récolte annuelle en volume $R(t)$, ou son contenu carbone $\Phi_R(t)$ peuvent aussi bien jouer le rôle d'excitation en alternative au prélèvement $P(t)$ qui leur est proportionnel. Production, prélèvement ou récolte sont à différencier pour les peuplements feuillus d'une part, résineux d'autre part. Les réponses du système sont les flux capturé Φ_{F1}et émis Φ_{F2}, les stocks de carbone dans les différents compartiments et l'ensemble des flux repérés sur la figure 1 . Le tableau 1 de l'annexe C précise les correspondances entre volumes « bois fort tige », volumes réels et contenus carbone.

.

D-2 Empreinte carbone d'un supplément ponctuel de récolte

Dans le cadre d'approximation adopté, l'ensemble des propriétés des systèmes linéaires invariants s'appliquent au « système forestier », notamment la propriété de superposition des solutions. En vertu de celle-ci, pour un couple entrée-sortie donné, il suffit de connaître la réponse à des signaux-test simples pour être en mesure de déterminer le comportement du système vis-à-vis de n'importe quelle excitation dès lors qu'on sait représenter cette dernière par une somme (ou une intégrale) de tels signaux-tests. C'est le cas, notamment, pour l'excitation impulsionnelle $\delta(t)$: la réponse $r(t)$ à une excitation quelconque $e(t)$ s'obtient par une intégrale de convolution portant sur la réponse impulsionnelle $h(t)$ (cf. expression 16). En bref, la réponse impulsionnelle d'un système linéaire invariant caractérise entièrement le système du point de vue de la relation entrée-sortie (ou excitation-réponse).

Il est donc important d'analyser la réaction du système forestier à une sollicitation-test impulsionnelle. On considérera, pour ne pas trop s'écarter des réalités, l'effet d'une récolte supplémentaire ponctuelle de 1 million de mètres-cubes réels, 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. 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 ligneuse n'est pas affectée ou, tout au moins, rapidement rendue conforme au scénario de référence par des interventions sylvicoles directes. La linéarité du système assure que les variations $\Delta Q(t)$, $\Delta\Phi(t)$ et $\Delta[dQ(t)/dt]$ subies par les stocks, flux et puits de carbone du fait de ce supplément de récolte obéissent aux mêmes équations que les stocks $Q(t)$, flux $\Phi(t)$ et puits $dQ(t)/dt$. Par contre, les conditions initiales sur les variations de stock ΔQ sont nulles par raison de continuité.

Une récolte de 10^6 m^3 réels de bois feuillus correspond à un prélèvement ligneux $0{,}69\times10^6$ m^3 en volume bois fort tige. Les contenus en carbone de la récolte et du prélèvement sont donc de 275 ktC et 391 ktC respectivement (cf. coefficients de conversion du tableau 1 de l'annexe C); la différence, 116 ktC, représente la somme du contenu carbone des pertes aériennes d'exploitation, estimées à 10% du prélèvement aérien, et de celui des racines des arbres exploités, généralement laissées en place. Pour être complet, on doit tenir compte du contenu carbone de la biomasse non ligneuse des arbres prélevés (feuillage, racines fines, mycéliums,...), qu'on estime à une fraction 80/1260 de celui du prélèvement ligneux, soit 25 ktC. L'ensemble de ces « pertes » étant destiné à décomposition plus ou moins rapide, on pourrait être tenté de résumer les conséquences du supplément de récolte à une diminution du stock de carbone forestier de 275+116+25 = 416 ktC et une émission dans l'atmosphère comprise entre 141 ktC et 416 ktC selon que le bois est conservé ou utilisé comme combustible, en mettant à part les émissions « amont » et les émissions de combustion autres que celles de CO_2. La réaction du « système forestier » doit cependant être prise en compte et vient notablement compliquer cette première vision des choses :

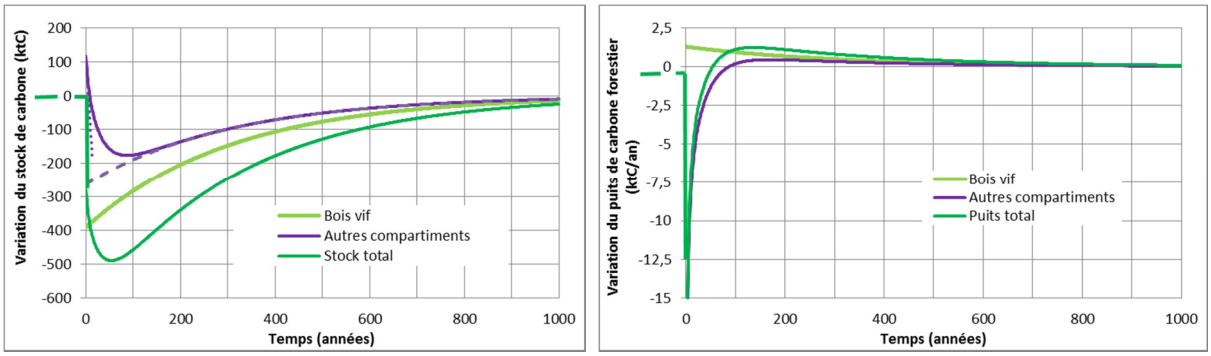
- La décomposition des « pertes », initialement stockées, d'après le schéma de la figure 1, dans les compartiments « bois mort » et « racines mortes » (pertes ligneuses) et dans les compartiments « litière » et « sol minéral » (pertes non ligneuses principalement), est étalée dans le temps.

- En raison de la réduction de la population d'arbres vifs, les apports de carbone à ces compartiments, par mortalité ou renouvellement de biomasse non ligneuse, sont diminués par rapport au scénario de référence : il s'ensuit un déstockage de carbone dans ces compartiments, notamment dans la litière et le sol minéral.

- L'évolution de la production biologique ligneuse serait changée, suite au supplément de récolte, s'il n'y avait intervention humaine pour la rétablir (remplacement plus ou moins synchrone des arbres exploités). L'hypothèse de travail selon laquelle cette production reste inchangée est donc quelque peu arbitraire, mais conforme au concept généralement accepté de gestion durable des forêts.

Plus précisément, les figures 3 a et b représentent, consécutivement au supplément ponctuel de récolte, les variations de stocks et puits de carbone dans le bois vif et les autres compartiments, par rapport au scénario de référence. Dans le formalisme continu adopté, les évolutions des puits (figure 3 b) sont les dérivées de celles des stocks (figure 3 a), c'est-à-dire correspondent aux pentes de ces dernières.

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 3 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. Par contre, ce scénario apporte des éléments de compréhension sur la dynamique du carbone forestier : au moins cette dynamique serait-elle calquée sur les évolutions indiquées pour une certaine durée (quelques dizaines d'années ?), indépendamment du scénario de référence.



(a) (b)

Figure 3 - variations des stocks (a) et des contributions au puits de carbone forestier (b), consécutives à un supplément ponctuel de récolte de 10^6 m^3 de bois feuillus.

La production biologique ligneuse est supposée ne pas être affectée par le supplément de récolte

D-2-1 Analyse

N.B. L'analyse des résultats présentés sur la figure 3, chiffrée ici dans le détail pour permettre sa vérification et sa reproduction, est nécessairement « indigeste ». Le lecteur pressé pourra, sans trop d'inconvénient, passer directement au paragraphe e) de cette section.

Les variations représentées sur les figures 3 a et b s'expliquent de la manière suivante.

a) Bois vif – En ce qui concerne le bois vif, la réduction initiale du stock correspond au prélèvement, (-391 ktC). Cependant, cette réduction entraîne celle de la mortalité annuelle en sorte que, à production biologique ligneuse inchangée, la production nette augmente ; ceci implique, d'après le bilan (1), 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 réduction du stock de carbone ΔQ^{bv} (exposant « bv » pour « bois vif ») tend donc asymptotiquement vers zéro. Plus précisément, la dynamique étant du premier ordre, on peut écrire, pour $t > 0$:

$$\Delta\left[dQ^{bv}/dt\right] + \Delta Q^{bv}/\tau_F = 0 \qquad (11)$$

d'où :

$$\Delta Q^{bv} = \Delta Q^{bv}_{t=0+} \exp(-t/\tau_F) \qquad (12)$$

avec $\Delta Q^{bv}_{t=0+}$= -391 ktC. La réduction de stock ΔQ^{bv} s'atténue exponentiellement avec τ_F = 307 ans pour constante de temps (figure 3 a, courbe vert pâle).

La contribution du bois vif au puits de carbone forestier est la dérivée de la variation du stock :

$$\Delta\left[dQ^{bv}/dt\right] = -\Delta Q^{bv}/\tau_F \qquad (13)$$

Après une impulsion négative pour $t = 0$ correspondant au prélèvement (-391 ktC), non représentée sur la figure 3 b), cette contribution devient positive par rapport au scénario de référence (capture) : en raison de la réduction de mortalité, l'accroissement annuel se trouve favorisé, comme indiqué plus haut. La variation d'intensité du puits « bois vif », juste après récolte, équivaut, d'après l'expression (13) au rapport de la réduction initiale de stock (qui correspond au supplément de prélèvement : 391 ktC en contenu carbone) à la constante de temps τ_F (307 ans), soit 1,28 ktC/an ; le

retour au scénario de référence s'effectue exponentiellement, comme pour le stock, avec la même constante de temps.

b) Autres compartiments que ceux de bois vif, temps « courts » – Au moment même de la récolte, les contenus carbone des pertes d'exploitation aériennes et racinaires sont transférés dans les compartiments « bois mort » et « racines mortes ». Ces compartiments voient donc, immédiatement après récolte, leur stock augmenter de 116 ktC (30,5 ktC de pertes aériennes, 85,5 ktC de pertes racinaires) : c'est l'ordonnée à l'origine de la courbe violette représentative de la variation de stock dans les compartiments autres que ceux de bois vif (cf. figure 3 a). La réduction du stock de carbone correspondant à la biomasse non ligneuse des arbres prélevés (-25 ktC) n'apparaît pas initialement car cette biomasse est transmise à la litière et au sol et reste donc dans les compartiments considérés. Le stock de carbone dans les compartiments autres que ceux de bois vif, d'abord excédentaire par rapport à celui du scénario de référence, devient cependant vite déficitaire. La décroissance, rapide à l'échelle des temps considérée sur la figure 3, résulte, d'une part, de la décomposition de la matière organique initialement déposée par les pertes d'exploitation, d'autre part, de la réduction des apports de carbone aux compartiments « bois mort », « racines mortes », « litière » et « sol » en raison des diminutions de mortalité ligneuse et de renouvellement non ligneux consécutives au prélèvement.

De son côté, la contribution des compartiments autres que ceux de bois vif au puits de carbone forestier, après une impulsion positive pour $t = 0$ correspondant à l'apport du carbone des pertes aériennes et racinaires (116 ktC, non représentée sur la figure 3 b), se trouve brutalement diminuée de 22,0 ktC/an (émission) qui est le cumul à $t = 0^+$ de contributions individuelles dQ/dt pouvant être détaillées de la manière suivante :

- À la diminution de 1,28 ktC/an déterminée plus haut pour le flux de carbone lié à la mortalité naturelle ligneuse, correspondent des réductions de flux entrant dans les compartiments « bois mort » et « racines mortes » de 1 ktC/an et 0,28 ktC/an respectivement. Cependant, les stocks de carbone dans ces compartiments ont augmenté, du fait des pertes d'exploitation, de 30,5 ktC (« bois mort ») et 85,5 ktC (« racines mortes ») ; les flux sortants, définis pour chacun des compartiments par le rapport du stock au temps de résidence, s'accroissent en conséquence de 30,5/18,1 ≈ 1,69 ktC/an (« bois mort ») et 85,5/32,5 ≈ 2,63 ktC/an (« racines mortes »). Les contributions de ces compartiments au puits de carbone forestier varient donc de -2,69 ktC/an (1 + 1,69) et -2,91 ktC/an (0,28 + 2,63) respectivement, le signe (–) soulignant qu'il s'agit d'un déstockage, donc d'une émission.

- La réduction de biomasse non ligneuse pour $t = 0$ (-25 ktC) prive les compartiments « litière » et « sol » du flux de carbone correspondant à son renouvellement, soit -25×(30/80) = -9,38 ktC/an pour la litière, -25×(20/80) = -6,25 ktC/an pour le sol minéral. Par contre, cette réduction de stock s'atténue en proportion de celle du « bois vif », ce qui génère une contribution au puits de carbone dont la valeur initiale est (80/1260)×1,28 = 0,08 ktC/an avec répercussion positive cette fois sur les flux délivrés : 0,08×(55/80) = 0,056 ktC/an à la litière, 0,08×(25/80) = 0,025 ktC au sol minéral. Les variations initiales des flux dirigés vers la litière et le sol sont donc de -9,32 ktC/an et -6,22ktC/an respectivement. À ces variations s'ajoutent algébriquement celles des flux issus du compartiment « bois mort » en ce qui concerne la litière (1,69/6 ≈ +0,28 ktC/an) et du compartiment « racines mortes » en ce qui concerne le sol minéral (2,63 ktC/an). Les variations

des flux entrant dans ces compartiments sont donc de -9,04 ktC/an (litière) et de -3,59 ktC/an (sol minéral).

- Les compartiments « litière » et « sol minéral » reçoivent, à l'origine $t = 0$, un stock de 25 ktC correspondant à la biomasse non ligneuse des arbres exploités, réparti 25× (55/80) = 17,1 ktC pour le premier, 25× (25/80) = 7,8 ktC pour le second. Les flux sortant de ces compartiments sont donc accrus de 17,1/4,9 = 3,48 ktC/an et de 7,8/22,7 = 0,34 ktC/an respectivement. Compte tenu des variations des flux entrants, la contribution initiale au puits de carbone de la litière est -12,52 ktC/an (-9,04 - 3,48) et celle du sol -3,93ktC/an (-3,59 - 0,34).

Au total, la contribution des compartiments autres que ceux de bois vif au puits de carbone forestier est, initialement, de ≈ 22 ktC/an (-2,69 - 2,91 + 0,08 - 12,52 - 3,93) (cf. figure 3 b). Cette valeur est aussi celle de la pente initiale de la variation de stock de carbone dans ces compartiments, pente marquée en pointillés sur la figure 3 a. Cette variation de stock par rapport au scénario de référence, d'abord positive, change de signe pour t ≈ 8 ans (t = 116/ 22 ≈ 5 ans si on suit la pente indiquée en pointillés sur la figure 3 a). La réduction maximale, 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 totales d'exploitation (116 ktC) : il y a en effet, dans les compartiments « bois mort », « racines mortes » et plus encore dans les compartiments « litière » et « sol minéral », un déstockage consécutif à la diminution de la mortalité ligneuse et du renouvellement non ligneux,. Une estimation du déstockage peut être faite, une fois achevée la décomposition des pertes d'exploitation aériennes et souterraines, en admettant, pour chacun des compartiments, la proportionnalité du stock au flux entrant, avec le temps de résidence pour coefficient comme si on se trouvait en régime permanent quasi statique. Par exemple, le sol minéral est privé d'un flux de carbone correspondant au renouvellement de biomasse non ligneuse souterraine, dont la valeur initiale est – 6,25 ktC/an et qui évolue, comme cette biomasse, en $\exp(-t/\tau_F)$: pour $t = 87$ ans, durée suffisamment grande devant le temps de résidence (22,7 ans), la réduction de l'apport est de 4,7 ktC/an et le déstockage s'élève à 107 ktC. On est conduit, suivant le même schéma de calcul, à un déstockage de 34,5 ktC pour la litière, 13,6 ktC pour le bois mort, 6,9 ktC pour les racines mortes et 18,8 ktC pour la biomasse non ligneuse soit au total : 180,8 ktC, estimation effectivement proche du minimum calculé de la courbe violette de la figure 3 a, qui est de 176 ktC.

c) Autres compartiments que ceux de bois vif, « 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 tous les compartiments est « forcée » par les flux de carbone issus des compartiments de bois vif et/ou par ceux, proportionnels, liés à la biomasse non ligneuse, et devient, par conséquent, exponentielle avec la même constante de temps τ_F (cf. appendice E). Les variations de stock et de puits sont alors semblables à celles de ces grandeurs pour le bois vif.

L'évolution, dans l'approximation de forçage, de la réduction de stock de carbone des compartiments autres que ceux de bois vif est représentée en tireté sur la figure 3 a. Cette évolution est décrite par l'expression $\Delta Q_f^{ac} = A \exp(-t/\tau_F)$ (exposant « ac » pour « autres compartiments » ; indice « f » pour « forcé »). Celle-ci est somme des expressions de même forme auxquelles répondent les variations forcées du stockage dans chacun des compartiments. Pour le compartiment bois mort aérien, par

exemple, la variation $\Delta\Phi_e^{bm}(t)$ du flux entrant (exposant « bm » pour « bois mort ») est réduite, pour $t > 0$, à la seule composante de mortalité ligneuse et a pour expression :

$$\Delta\Phi_e^{bm}(t) = 0{,}78\,\Delta Q^{bv}(t)/\,\tau_F \approx -\,0{,}99\,\exp(-t/\tau_F) \tag{14}$$

En régime de forçage, la variation $\Delta Q_f^{bm}(t)$ de stock serait donc (cf. appendice E) :

$$\Delta Q_f^{bm}(t) = -\,0{,}99\,\frac{\tau_F\tau_{bm}}{\tau_F-\tau_{bm}}\,\exp(-t/\tau_F) \tag{15}$$

soit $\Delta Q_f^{bm}(t) = -\,19{,}1\,\exp(-t/\tau_F)$ ktC pour τ_{bm} = 18,1 ans. En procédant de même pour les autres compartiments et en faisant la somme des coefficients, on est conduit à la valeur $A = -\,262$ ktC qui représente l'ordonnée à l'origine de la courbe tiretée de la figure 3 a.

d) Variations globales du stock et du puits de carbone forestier – Consécutivement au supplément ponctuel de récolte, la variation du stock global de carbone par rapport au scénario de référence, représentée par la courbe vert foncé sur la figure 3 a, a pour valeur initiale -275 ktC qui correspond 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, 54 ans après l'année du 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 variation globale du puits de carbone découle de celle du stock par dérivation : impulsion initiale négative de 275 ktC correspondant au contenu carbone de la récolte, émission (« source ») jusqu'à $t = 54$ ans, ensuite capture (véritablement « puits») et retour progressif au scénario de référence.

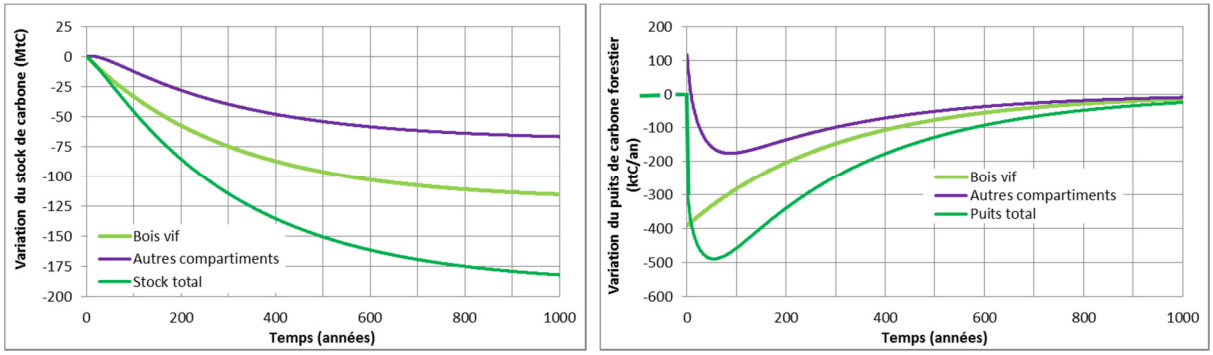
e) Aperçu sur la généralisation – Bien qu'illustrés numériquement dans un cas particulier, les résultats représentés graphiquement sur la figure 3 ont une portée générale. Dans le cadre d'approximation adopté, toute opération linéaire effectuée sur « l'entrée » (récolte ou prélèvement), se traduit par la même opération sur la « sortie » (stocks, puits) ; il en est ainsi de la multiplication par une constante, de la dérivation 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 », la représentation des variations de puits coïnciderait avec celle des variations de stocks de la figure 3 a, celle des variations de stocks correspondant, de son côté, aux intégrales des précédentes (figures 4 a et b) ; l'échelon peut en effet être considéré comme le résultat de l'intégration d'une impulsion.

Plus généralement, si la variation de récolte, au lieu d'être « impulsionnelle » est continûment variable au cours du temps, l'évolution de la variation $\Delta Q(t)$ du stock de carbone forestier dans le cadre d'approximation adopté, quel que soit le scénario de référence, s'obtient par l'intégrale de convolution :

$$\Delta Q(t) = \int_0^t \Delta\Phi_R(t')h(t-t')dt' = \int_0^t \Delta\Phi_R(t-t')h(t')dt' \tag{16}$$

où $\Delta\Phi_R(t)$ est la variation de récolte annuelle en terme de flux de carbone et $h(t)$ est la variation adimensionnelle du stock de carbone forestier observée dans le cas d'une récolte ponctuelle unitaire

(réponse impulsionnelle). Toute autre grandeur que la variation de stock de carbone forestier peut être calculée de la même manière. Il s'agit là d'un lemme fondamental de la théorie des systèmes linéaires invariants (cf., par exemple, Arzelier 2010).



(a) (b)

Figure 4 - variations des stocks (a) et des contributions au puits de carbone forestier (b), consécutives à un supplément permanent de récolte de 10^6 m^3/an de bois feuillus.

La production biologique ligneuse est supposée ne pas être affectée par le supplément de récolte

L'échelle des ordonnées de la figure 4 a est graduée en MtC, celle de la figure 4 b en ktC/an

Si la récolte porte sur les bois résineux, la constante de temps τ_R = 262 ans pour le bois vif remplace τ_F = 307 ans et seules sont modifiées les valeurs d'un petit nombre de coefficients : rapport entre la masse de carbone et le volume de bois fort tige (0,38 tC/m^3 au lieu de 0,567 tC/m^3), rapport entre masses de carbone aérienne et totale pour le bois vif (0,77 au lieu de 0,78), rapport entre masses de carbone racinaire et totale (0,23 au lieu de 0,22). Si la récolte supplémentaire porte à la fois sur des bois feuillus et résineux, les variations de stock et de flux s'obtiennent par sommation des résultats obtenus en considérant séparément l'effet des variations de prélèvement feuillu et de prélèvement résineux.

Enfin, si la production biologique est volontairement modifiée ou si cette production est affectée en répercussion de la variation de récolte, il suffit de considérer à part l'effet de la variation de production $\Delta G(t)$ et de le rajouter algébriquement à celui de la variation de récolte. Vis-à-vis des compartiments de bois vif, la production biologique $G(t)$ joue, au signe près, le même rôle que le prélèvement, comme l'indique l'équation (4), une complication mineure étant toutefois que les compartiments « bois mort aérien » et « racines mortes » subissent de manière différenciée les modifications de production biologique et de prélèvement en raison de la ventilation de ce dernier en récolte et pertes d'exploitation.

D-2-2 Conclusions sur l'empreinte carbone d'une récolte ponctuelle

Les conclusions importantes qui peuvent être tirées des résultats des figures 3 et 4 sont les suivantes :

- Quelle que soit l'évolution de la forêt française, qu'elle soit naturelle ou planifiée, toute perturbation apportée par une modification de production biologique ou de prélèvement ne s'amortit qu'après un temps très long qui se chiffre en plusieurs unités de la plus grande des constantes de temps principales $\tau_F \approx 307$ ans (feuillus) et $\tau_R \approx 262$ ans (résineux) soit de l'ordre

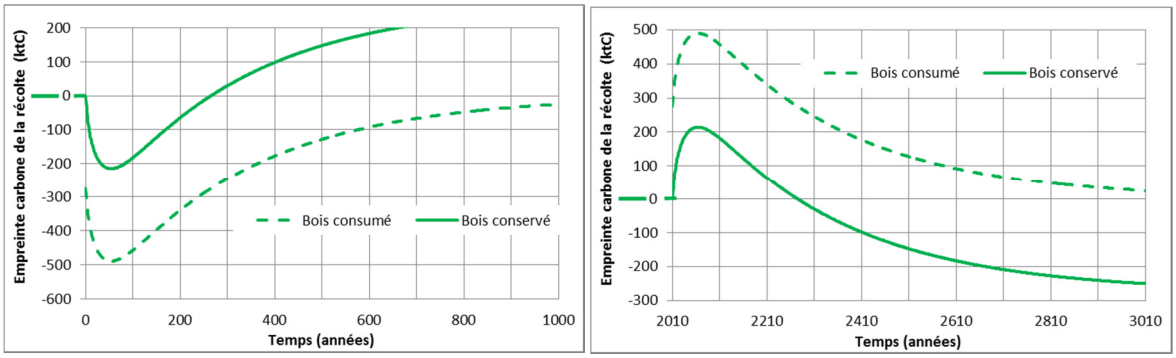
du millier d'années si on se réfère à la notion de temps de réponse à 5% (≈ 3τ). Ces constantes de temps, définies comme les inverses des taux de mortalité en volume, sont en relation avec la longévité des arbres feuillus d'une part, résineux d'autre part, en moyenne pondérée selon les essences, hors prélèvement.

- La courbe vert foncé de la figure 3 a qui représente, en fonction du temps, la réduction de stock de carbone forestier causée par un supplément ponctuel de récolte, toutes choses restant inchangées par ailleurs, décrit aussi l'évolution en fonction du temps de l'empreinte carbone du prélèvement (ou celui de la récolte) dans l'hypothèse où le bois récolté sert de combustible (section 1-2 de l'annexe B). Cette empreinte est ici négative, correspondant, suivant la convention de signe adoptée, à une émission nette de carbone ; la dérivée de l'empreinte, matérialisée par la pente de la courbe, s'identifie à la variation du puits de carbone forestier dont l'évolution est représentée sur la figure 3 b. Aux temps « longs », les résultats semblent donner raison aux tenants de la « neutralité carbone » du bois énergie : la variation du puits de carbone forestier tend vers zéro et il en est de même pour l'empreinte. Les conséquences de la récolte finissent 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 stable. Le mécanisme stabilisateur est ici la mortalité, qui est une 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. Si la contrainte exercée sur la forêt est permanente, on est conduit à un régime lui-même permanent (ou forcé) à l'issue d'un régime transitoire qui, dans le cadre d'approximation adopté, est composé de modes exponentiels décroissants dont les constantes de temps sont les temps de résidence du carbone dans les différents compartiments. Dans le cas de la figure 4 où la contrainte est statique, la variation du puits de carbone s'annule aussi aux temps « longs », mais l'empreinte carbone tend asymptotiquement vers une valeur constante définie, en ce qui concerne le bois vif, par l'égalité de la diminution de mortalité et de l'augmentation de prélèvement ΔP, soit en termes de contenus carbone $\Delta Q^{bv}_{t\to\infty}/\tau_F$ = – 0,567 ΔP d'où $\Delta Q^{bv}_{t\to\infty}$ = -120 MtC, l'empreinte totale s'élevant à -190 MtC compte tenu du déstockage des compartiments autres que ceux de bois vif. La situation de « neutralité carbone » pour les temps « longs », intéressante d'un point de vue théorique, n'est qu'un cas d'école, car, quel que soit le scénario de référence, elle est hors de portée dans le temps. Elle ne doit pas dissimuler le fait que l'émission de combustion du bois récolté, celle qui est liée à la décomposition des « rémanents », c'est-à-dire des pertes d'exploitation ligneuses et non ligneuses, et celle provenant du déstockage de carbone dans plusieurs compartiments, se trouvent compensées non par une capture additionnelle de carbone dans l'atmosphère (la production biologique ligneuse du scénario de référence est supposée inchangée) mais par une diminution du flux de mortalité. La résilience de la forêt est réelle mais ne se manifeste que tardivement. Comme cela est souligné dans l'Annexe B et illustré plus loin, le seul moyen de garantir la « neutralité » d'une augmentation de récolte est d'accroître la production biologique annuelle de biomasse ligneuse et non ligneuse à hauteur de l'augmentation des prélèvements et ce, de manière synchrone.

- L'empreinte carbone d'un supplément ponctuel de récolte, si le bois sert de combustible, correspond initialement à son contenu carbone, ce qui est aisément compréhensible. Elle augmente ensuite en valeur absolue et passe par un extremum marqué (cf. figure 3 a) qui résulte

du cumul des émissions liées à la décomposition des pertes d'exploitation ligneuses et non ligneuses et au déstockage dans les compartiments privés des apports en carbone qui provenaient des arbres avant qu'ils ne soient exploités (mortalité, renouvellement de biomasse non ligneuse). Dans le cas d'exemple, cet extremum s'élève à 489 ktC pour une récolte de 275 ktC, soit plus encore que les 416 ktC d'une estimation reposant sur les seules « pertes ». Cette empreinte diminue ensuite, mais l'extremum intervient au plus mauvais moment (57 ans après récolte) eu égard aux échéances climatiques de la fin de ce siècle. 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. Ceux-ci conduisent à admettre, pour le facteur d'émission « apparent » du bois énergie, un presque doublement par rapport à sa valeur « intrinsèque », pour autant que la notion de facteur d'émission ait encore un sens dans le cas du bois lorsqu'on prend en compte le puits de carbone forestier. Cette conclusion ne doit pas être considérée comme une invite à récupérer tout ou partie des pertes d'exploitation (bois mort, racines mortes..). Ce serait très certainement contre-productif, par abaissement de la fertilité des stations mais surtout par les émissions résultant d'un 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, 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 vraisemblablement supérieure au contenu carbone du combustible collecté.

- Si le bois récolté est conservé au lieu d'être brûlé, son contenu carbone s'ajoute au stock de carbone forestier en sorte que la représentation de l'empreinte carbone (cf. figure 3 a) est simplement translatée positivement de la valeur de ce contenu carbone selon l'axe des ordonnées (cf. section 1-3 de l'annexe B). 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 (figure 5). En ce qui concerne la variation du puits de carbone, rien n'est changé hormis l'impulsion initiale qui se trouve ramenée à zéro.



(a) (b)

Figure 5 - 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 ligneuse

Les deux tracés de la figure 5 a bornent l'intervalle dans lequel s'inscrirait l'empreinte pour une récolte mixte, selon les proportions de bois utilisées pour l'énergie, pour un usage durable, ou partiellement vouée à décomposition (émissions « 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 échéances climatiques de la fin de ce siècle. 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 organique consumée ou décomposée. 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 nombreuses sources de chaleur non carbonées (nucléaire, solaire...) et que la substitution du bois aux combustibles fossiles se traduit par une augmentation des émissions.

- Dans le cas d'école 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 5 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 (bien 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.

- La neutralité carbone du bois énergie présuppose, comme cela est démontré dans l'annexe B, une gestion de la forêt à stock constant, ce qui ne peut être réalisé qu'en d'adaptant la production biologique à hauteur du prélèvement, ce, de manière synchrone. En s'appuyant sur le cas d'un supplément de récolte de 10^6 m^3/an de bois feuillus, moins éloigné des réalités de terrain que la récolte ponctuelle, la figure 6 permet d'illustrer cette condition en même temps que de résumer l'essentiel de 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 cette production. Dans le cas de combustion du bois récolté, l'empreinte carbone, qui correspond à la variation du stock de carbone forestier représentée sur la figure 4 a, est négative (émission). Dans le cas de la conservation, l'empreinte 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 aérienne et racinaire, 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).

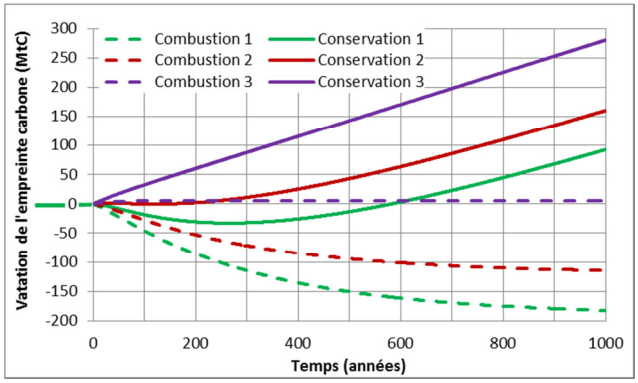


Figure 6 – Variations de l'empreinte carbone pour un supplément de récolte de 10^6 m^3/an de bois feuillus avec ajustement de production biologique.

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.

D-3 Un scénario « au fil de l'eau »

L'évaluation de l'effet d'une perturbation sur l'évolution d'un système linéaire invariant ne nécessite pas la connaissance de l'évolution en l'absence de perturbation. Cette possibilité a été mise à profit dans la section précédente pour donner toute leur généralité à des conclusions importantes. Par contre, pour apprécier concrètement l'impact « effet de serre » de diverses options de prélèvement et d'utilisation des récoltes, il est commode de disposer d'un scénario de référence pour l'évolution possible sinon probable de la forêt française au fil du temps. Le plus simple est de prendre, pour condition initiale, l'état de la forêt qui a été assez précisément défini pour l'année 2010 dans l'annexe C et de dérouler le scénario sur la base du « modèle » des figures 2 et 3, sans modification de paramètres. Ce scénario de référence est dit « au fil de l'eau ». On limite la perspective à l'année 2050 qui doit marquer une étape cruciale dans la réduction des émissions de gaz à effet de serre (facteur 4, MEDDE 2013). On envisage cependant un plus long terme (3010), de manière toute théorique, aux fins d'éclairer l'analyse.

D-3-1 Compartiments de bois vif

En se reportant aux données IGN des sections 2-2 et 2-3 de l'annexe C, les conditions initiales et paramètres concernant les compartiments de bois vif ont les valeurs indiquées dans le tableau 1 en termes de volumes « bois fort tige ».

	Volume (10^6 m^3)	Production (10^6 m^3/an)	Prélèvement (10^6 m^3/an)	τ (années)
Feuillus	$V_{0F} = 1625$	$G_{0F} = 54{,}2$	$P_{0F} = 20{,}3$	$\tau_F = 307$
Résineux	$V_{0R} = 890$	$G_{0R} = 36{,}3$	$P_{0R} = 21{,}2$	$\tau_R = 262$

Tous volumes « bois fort tige »

Tableau 1 - Valeurs des paramètres initiaux pour les compartiments de bois vif

Les fonctions représentant la production biologique (G) et le prélèvement annuel (P) sont a priori quelconques. Une approximation linéaire par segments est suffisante pour des scénarios simples et on peut poser, respectivement pour les feuillus (indice F) et pour les résineux (indice R) :

$$G_F(t) = G_{0F} + g_F t \qquad G_R(t) = G_{0R} + g_R t \qquad (17)$$

$$P_F(t) = P_{0F} + p_F t \qquad P_R(t) = P_{0R} + p_R t \qquad (18)$$

Les données permettant le choix des valeurs des paramètres g_F, g_R pour un scénario au fil de l'eau sont encore fragiles. Dans l'état actuel de l'inventaire forestier, on ne décèle pas de variation sensible de la production biologique ligneuse totale non plus que de ses composantes, productions des peuplements feuillus, résineux, mixtes et des peupleraies, comme le montre la figure 7.

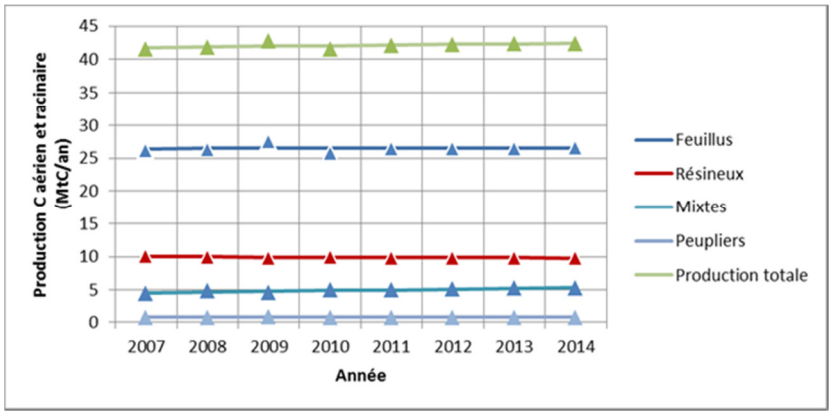


Figure 7 - Productions biologiques selon les données de l'IGN (nouvelle méthode).

Cependant, les données d'inventaire « ancienne méthode » (antérieures à 2005) indiquaient, une progression régulière de la production biologique nette d'environ 10^6 m^3/an^2 depuis le début des années 1980 (Map et IFN 2006). Dans une étude encore récente de l'IGN sur le puits de carbone « biomasse » des forêts gérées de France métropolitaine (Colin 2014), est d'ailleurs prévue une progression de cet ordre, ≈ $0{,}96\times10^6$ m^3/an^2, en moyenne, pour la production biologique brute sur la période 2011-2030. Diverses raisons permettent d'appuyer l'hypothèse d'une croissance de production, malgré l'absence de confirmation dans l'état actuel de l'inventaire forestier « nouvelle méthode » ; on peut citer, outre l'augmentation de la surface de production et le dynamisme de la croissance de jeunes peuplements, notamment feuillus, l'allongement de la saison de végétation, la croissance de la concentration de CO_2 dans l'atmosphère et l'augmentation des dépôts azotés qui « dopent » la production ligneuse. On envisagera donc deux hypothèses pour le scénario « au fil de l'eau : production biologique annuelle constante ($g_F \approx g_R \approx 0$), comme le suggère la figure 7 production croissante en retenant les moyennes $g_F \approx 0{,}84\times10^6$ m^3/an^2 et $g_R \approx 0{,}12\times10^6$ m^3/an^2 (volumes bois fort tige) prévues par l'IGN sur la période 2011-2030 suivant un scénario « tendanciel » (Colin 2014).

En ce qui concerne les paramètres p_F et p_R, la même difficulté se présente avec des données d'inventaire trop peu nombreuses et des marges d'incertitude trop importantes pour qu'il soit possible de déceler un sens de variation des prélèvements. Si on se réfère aux statistiques portant sur la commercialisation des bois récoltés, représentées graphiquement sur la figure 8, on ne

remarque pas non plus d'évolution marquante en ce qui concerne la récolte totale. Encore faut-il garder à l'esprit qu'il n'y a pas correspondance simple entre les prélèvements aériens de bois « fort tige » et les volumes commercialisés sous différentes formes (grumes, rondins...), ne serait-ce qu'en raison des pertes d'exploitation, de l'autoconsommation de bois de chauffage qui échappe à ces statistiques, et de l'asynchronisme entre prélèvement et commercialisation de la récolte. Dans ces conditions, on admettra $p_F \approx p_R \approx 0$, choix qui, pas plus que celui qui est fait en ce qui concerne les paramètres g_F et g_R, n'est vraiment critique puisqu'il s'agit simplement de dérouler un scénario de référence plausible pour évaluer les conséquences de diverses options de prélèvement.

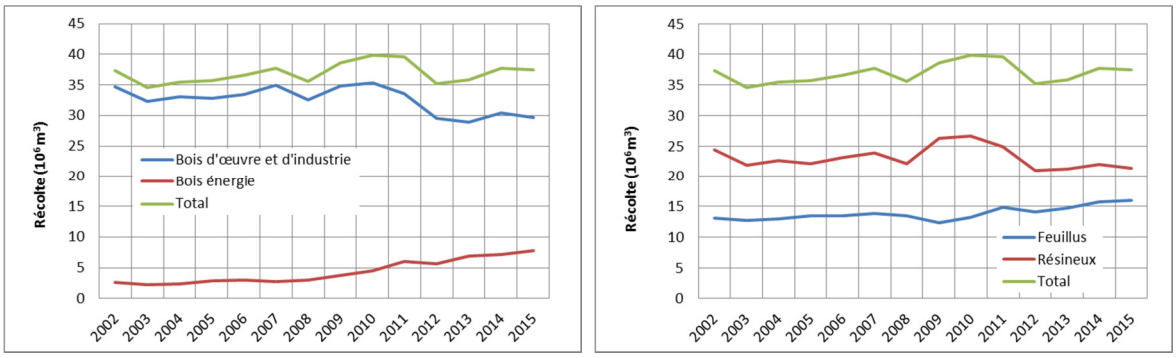
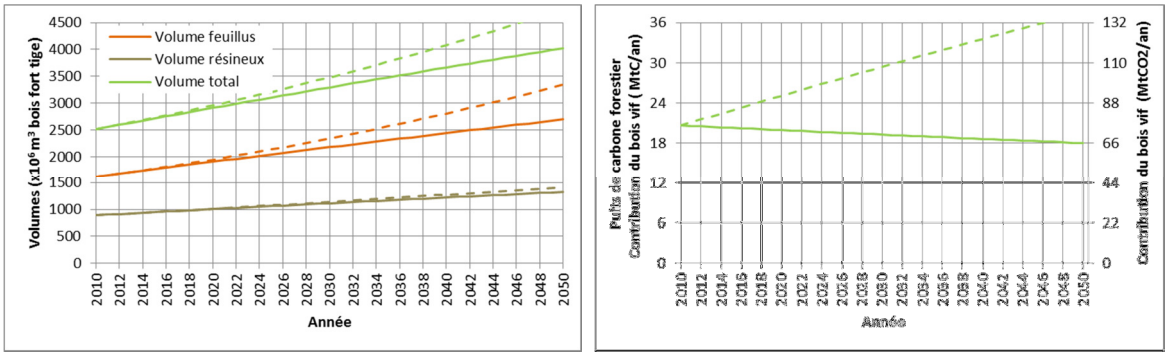


Figure 8 – Évolution récente des récoltes commercialisées, d'après AGRESTE (2016)

Les récoltes sont ici exprimées en millions de mètres cubes réels par an

(Au bois énergie, il faut rajouter la récolte autoconsommée qui est restée à peu près stable pendant les deux dernières décennies, de l'ordre de 20 à 22 millions de mètres-cubes par an)

On est conduit, dans ces conditions, aux résultats présentés graphiquement sur les figures 10 a pour l'évolution des volumes de bois fort tige et 10 b pour celle de la contribution des arbres vifs au puits de carbone forestier. Cette contribution se déduit du calcul des accroissements (6) par application des coefficients de conversion de volume bois fort en contenu carbone : 0,567tC/m^3 pour les feuillus, 0,38tC/m^3 pour les résineux.



(a) (b)

Figure 9 - Évolutions des volumes de bois sur pied (a)

et de la contribution du bois vif au puits de carbone forestier (b) dans un scénario « au fil de l'eau »

Les tracés continus correspondent à $g_F \approx g_R \approx 0$ (production constante), les tracés tiretés à $g_F \approx 0{,}84\times10^6$ m^3/an^2 et $g_R \approx 0{,}12\times10^6$ m^3/an^2 (production linéairement croissante)

L'accroissement des volumes de bois sur pied est dicté par une production biologique nette (mortalité déduite) qui, sur la période considérée (2010-2050) est et reste plus élevée que le prélèvement [cf. bilan (1)]. Les volumes ligneux continuent donc d'augmenter à un rythme soutenu, comme cela est constaté depuis plusieurs dizaines années déjà (cf. figure 4 de l'annexe C), bien davantage dans l'hypothèse d'une production biologique croissante (tracés tiretés). Dans l'hypothèse de production constante (tracés pleins), à prélèvement annuel lui-même constant, l'accroissement qui est initialement de $40{,}3\times10^6$ m^3/an (bois fort tige), décroît quelque peu au fil du temps en raison de la diminution de production nette qu'entraîne l'augmentation de mortalité. L'accroissement se réduit ainsi à $37{,}6\times10^6$ m^3/an vers 2030 et à $35{,}2\times10^6$ m^3/an vers 2050. 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.

D-3-2 Autres compartiments

Les stocks de carbone initiaux (Q_0) et les constantes de temps τ qui caractérisent les compartiments autres que le bois vif dans le cadre de l'approximation choisie (linéaire du premier ordre à coefficient constant), sont rappelés dans le tableau 2 (cf. section 2 de l'annexe C).

Compartiment	Stock initial de carbone (MtC)	Temps de transit, de résidence ou de renouvellement (ans)
Bois mort	77	18,1
Racines mortes	166	32,5
Biomasse non ligneuse	80	
aérienne	55	1,8
souterraine	25	1,25
Litière	145	4,9
Sol minéral (0-10 cm)	485	22,7
(> 10 cm)	870	comparativement élevé

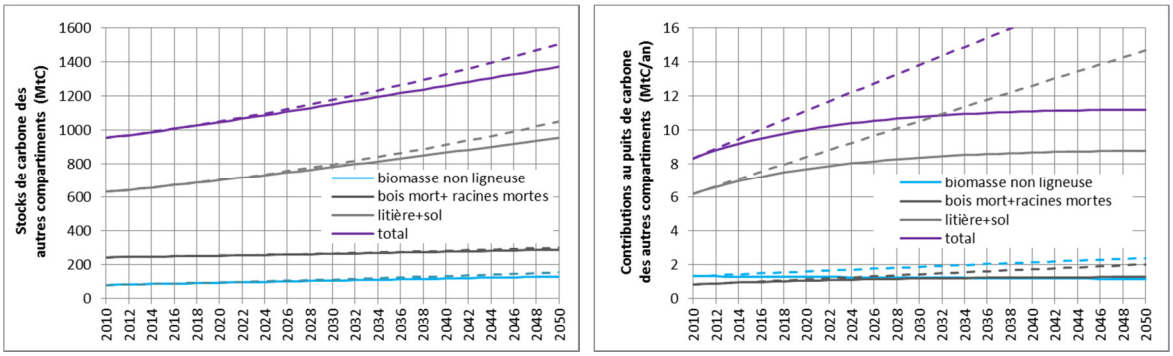
Tableau 2 - Valeurs des paramètres caractérisant les compartiments autres que ceux de bois vif

Mises à part les conditions initiales qui sont ici effectivement prises en compte, les données de calcul sont les mêmes que pour le scénario précédent (section D-2).

Selon le schéma de calcul illustré par les figures 1 et 2 et résumé par l'expression (9), les stocks de carbone dans les différents compartiments autres que ceux de bois vif évoluent comme indiqué sur la figure 10 a. Les contributions correspondantes de ces compartiments au puits de carbone forestier sont reportées sur la figure 10 b. Compte tenu des incertitudes entourant les valeurs des conditions initiales et des constantes de temps, ces résultats doivent être considérés dans leur ensemble, non dans leur détail, et seuls les ordres de grandeur peuvent être retenus. Ceux-ci mettent en évidence, au moins dans le cadre d'un scénario « au fil de l'eau », que les stockages de carbone dans les compartiments « biomasse non ligneuse », « bois mort » et « racines mortes » sont de bien moindre importance que dans la litière et le sol minéral. Dans l'hypothèse d'une production biologique constante, les contributions moyennes au puits de carbone forestier sur la période 2010-2050 s'étageraient de la manière suivante : « racines mortes » ≈ 0,33 MtC/an
« bois mort » ≈ 0,80 MtC/an

« biomasse non ligneuse »	≈ 1,23MtC/an
« litière »	≈ 2,28 MtC/an
« sol minéral »	≈ 5,82 MtC/an

pour un total de 10,46 MtC/an.



(a) (b)

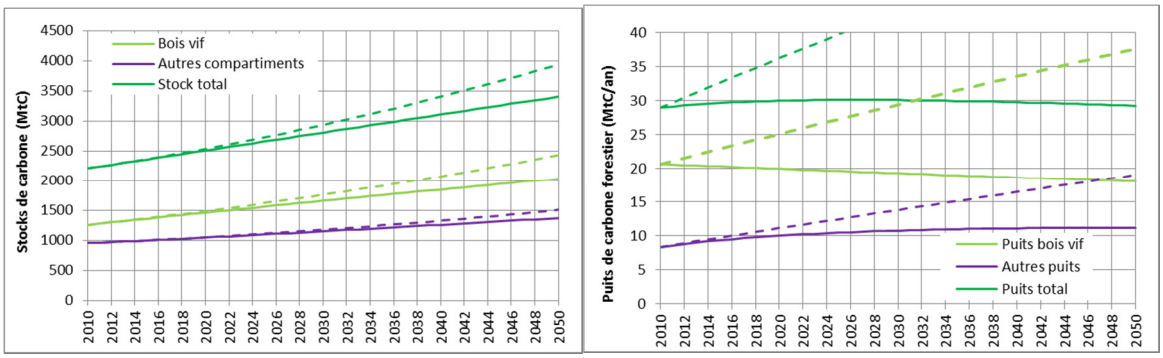
Figure 10 - Évolutions approximatives des stocks de carbone dans les compartiments autres que ceux de bois vif (a) et contributions correspondantes au puits de carbone forestier (b), dans un scénario « au fil de l'eau »

Les tracés continus correspondent à $g_F \approx g_R \approx 0$ (production constante), les tracés tiretés à $g_F \approx 0{,}84\times10^6$ m^3/an^2 et $g_R \approx 0{,}12\times10^6$ m^3/an^2 (production 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

D-3-3 Tous compartiments

La figure 11 regroupe les résultats obtenus pour les compartiments de bois vif et les autres compartiments en ce qui concerne l'évolution des stocks de carbone (figure 11 a) et les contributions au puits de carbone forestier (figure 11 b).



(a) (b)

Figure 11 - Évolutions approximatives 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 $g_F \approx g_R \approx 0$ (production constante), les tracés tiretés à $g_F \approx 0{,}84\times10^6$ m^3/an^2 et $g_R \approx 0{,}12\times10^6$ m^3/an^2 (production 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

Dans l'hypothèse d'une production biologique constante, l'affaiblissement du puits de carbone « bois vif » est approximativement compensé par l'augmentation de la contribution des autres compartiments entre 2010 et 2050, en sorte que le puits global forestier reste sensiblement constant sur la période considérée à un niveau moyen de 29,8 MtC/an.

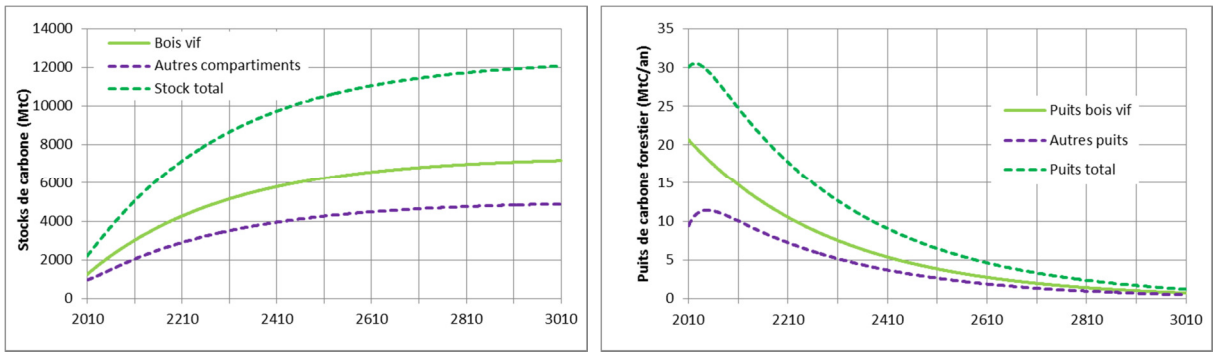
D-3-4 Remarques sur le scénario « au fil de l'eau »

- Le scénario « au fil de l'eau » ci-dessus n'est pas exactement le prolongement direct, au-delà de l'année 2010, des évolutions passées qu'illustre la figure 4 de l'annexe C en ce qui concerne les volumes sur pied de bois feuillus et résineux. Pour déterminer l'état de la forêt en 2010, on s'est en effet appuyé sur des données d'inventaire traitées de manière simplifiée (hypothèse de permanence ou de régime forcé pour les compartiments autres que ceux de bois vif), alors que le scénario « au fil de l'eau », s'il emprunte bien ses conditions initiales sur les stocks à l'état de 2010, se déroule sans cette simplification de régime forcé et avec des hypothèses de production biologique, prélèvement et mortalité ne correspondant pas forcément aux conditions réelles qui présidaient à l'évolution de la forêt antérieurement à 2010.

- En dépit des incertitudes qui entourent les résultats relatifs aux compartiments autres que ceux de bois vif (figure 9), il est permis d'affirmer que la dynamique des stocks de carbone dans ces compartiments ne peut être ignorée dans les évaluations prospectives du rôle de puits de carbone des forêts. Aussi est-il urgent de décrire de manière plus précise et globale les échanges en « cascade » de carbone entre les compartiments « biomasse non ligneuse », « bois mort », « racines mortes », d'une part, la litière et le sol minéral, d'autre part, avant son retour à l'atmosphère. On trouve dans la littérature des publications abordant ce sujet dans des contextes restreints à des essences ou des sites particuliers, aucune cependant ne proposant des résultats globaux applicables à l'échelle d'un massif forestier ou du domaine forestier d'un pays tout entier. Le changement de paradigme qu'impose la menace climatique en matière forestière, devrait pousser à inventorier ces compartiments, souvent considérés comme secondaires, de manière aussi détaillée et précise que ce qui est pratiqué pour le bois vif.

- Si l'on prolongeait le scénario à production biologique et prélèvement constants bien au-delà de l'année 2050, on approcherait d'un état d'équilibre théorique, les stocks de carbone dans les différents compartiments tendant asymptotiquement vers des valeurs constantes, avec annulation corrélative des contributions correspondantes au puits de carbone (figure 12). Sur la période 2010-3010, l'empreinte carbone de la forêt française s'élèverait à ≈ 9800 MtC (empreinte positive, donc capture) dans l'hypothèse même où tout le bois récolté serait brûlé ou décomposé (pas de stockage hors forêt). La dynamique forestière à long terme apparaît de nature simplement exponentielle, régie par les constantes de temps τ_F et τ_R des compartiments de bois vif, l'évolution des autres compartiments, dont les constantes de temps caractéristiques sont bien plus brèves, se trouvant alors forcée (cf. section D-2). Il est facile de préciser l'état d'équilibre qui est défini, pour le bois vif, par une mortalité annuelle égale à la différence entre production brute et prélèvement (accroissement nul), les flux d'entrée et de sortie devenant égaux pour chacun des autres compartiments ($\approx Q/\tau$). On détermine ainsi un stock asymptotique de carbone de 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 de 810 tC/ha dont 460 tC/ha pour le bois vif avec un volume « bois fort tige » de près de 900 m^3/ha.



(a) (b)

Figure 12 - 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 n'ont qu'une valeur illustrative, 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 12 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 l'accroissement ligneux par des prélèvements injustifiés.

- Le puits de carbone du scénario « au fil de l'eau » à l'horizon 2050 s'établit 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 comme le suggère l'IGN pour la période 2010-2030. 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, selon le CITEPA (2014), de 392 mégatonnes hors secteur UTCF (utilisation des terres, leur changement et la forêt), auxquelles il convient d'ajouter la part des terres non forestières dans le secteur UTCF, estimée à 7 $MtCO_2$, et l'émission de combustion de la biomasse chiffrée à 42 $MtCO_2$, soit un total de ≈ 440 $MtCO_2$ ou ≈ 120 MtC. L'objectif d'émission pour 2050 devrait donc être affiché à 110 $MtCO_2$/an ou 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 paraissent inconsidérées) et que la division par 4 des émissions « fossiles » soit effective.

D-4 Scénario d'augmentation de récolte de bois pour l'énergie

Les paramètres d'un scénario d'augmentation de la récolte pour l'énergie peuvent, *a priori*, être choisis librement, dans certaines limites : le but est de quantifier l'effet de variations de récolte sur l'intensité du puits de carbone, non de simuler une hypothétique évolution de la forêt française qui sera, quoiqu'on fasse, soumise à des aléas divers, climatiques, sanitaires, économiques, etc.

Cependant, pour ne pas trop s'éloigner de la réalité, il est préférable d'inscrire ce scénario dans le cadre du Plan d'action national en faveur des énergies renouvelables (2010) et, au-delà de l'année 2020, dans celui de la Loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte (2015).

En application de directives européennes, et comme beaucoup d'autres pays, 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 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 envisagé, ces deux chiffres seront retenus comme hypothèse « basse » (+2,8 Mtep) et hypothèse « haute» (+5Mtep). On admettra, pour simplifier, que la récolte porte sur les bois feuillus et résineux selon leur proportion dans le volume total de bois sur pied (65 % et 35 % respectivement) et que l'augmentation est répartie linéairement sur la durée théorique du Plan (10 ans). Par ailleurs, on présume que les récoltes de bois d'œuvre et de bois d'industrie se maintiendront aux mêmes niveaux qu'actuellement. Une inconnue est l'évolution de la production biologique ligneuse compte tenu de l'augmentation du prélèvement, des variations de facteurs naturels, démographiques, climatiques... et des investissements en soins sylvicoles, boisements et reboisements. Dans le doute, et pour ne pas tomber dans une complexité qui cacherait l'essentiel, on fait choix de se référer au scénario « au fil de l'eau » à production annuelle fixe ($g_F \approx g_R \approx 0$) et d'admettre que cette production n'est pas affectée par le prélèvement.

a) Valeurs des paramètres pour les scénarios

Le tableau 3 détaille les opérations par lesquelles, à partir des prévisions du plan, on détermine les valeurs des paramètres p_F et p_R de l'augmentation annuelle des prélèvements feuillus et résineux pour les deux hypothèses « basse » et « haute » [cf. expressions 18]. L'objectif 2020 chiffré en énergie (Mtep/an) est converti en augmentation de biomasse ligneuse récoltée (Mt/an) sur la base d'un PCI (matière sèche) de 18,5 gigajoules par tonne ou 0,442 tonne-équivalent-pétrole par tonne puis en mètres cubes réels compte tenu des infra-densités des bois feuillus et résineux (0,55 et 0,44 t/m^3 respectivement) et de leur proportion dans le volume de récolte additionnelle (65 % et 35 % respectivement). Seule la partie aérienne des arbres est normalement concernée par la récolte. Les valeurs d'augmentation du prélèvement aérien tiennent compte des pertes d'exploitation, estimées à 10 % de celui-ci. La conversion en volume de prélèvement « bois fort tige » utilise les facteurs d'expansion « branches » (1,61 pour les feuillus, 1,33 pour les résineux). L'augmentation de prélèvement pour les feuillus d'une part, pour les résineux d'autre part, répartie linéairement sur la durée du Plan conduit aux valeurs de paramètres p_F et p_R à utiliser dans les expressions (18). Ici

encore, la précision n'est qu'apparente, liée à un souci de cohérence arithmétique : les chiffres indiqués ne sont jamais que des approximations.

Objectifs 2010-2020 d'augmentation de....							
	l'énergie (Mtep/an)	biomasse récoltée (Mt/an)		récolte ($x10^6$ m^3/an réels)	prélèvement ($x10^6$ m^3/an aérien)	prélèvement ($x10^6$ m^3/an bois fort tige)	p_F, p_R ($x10^6$ m^3/an^2 bois fort tige)
Scénario hypothèse basse	+2,8	+6,34	Feuillus	+8,04	+8,94	+5,55	0,555
			Résineux	+4,33	+4,82	+3,62	0,362
			Total	+12,37	+13,76	+9,17	0,917
Scénario hypothèse haute	+5	+11,32	Feuillus	+14,39	+15,98	+9,93	0,993
			Résineux	+7,74	+8,60	+6,47	0,647
			Total	+22,12	+24,58	+16,40	1,640

Tableau 3 : Paramètres p_F et p_R de l'augmentation de prélèvement (expressions 18)

Aux paramètres initiaux du tableau 1, il faut donc adjoindre...

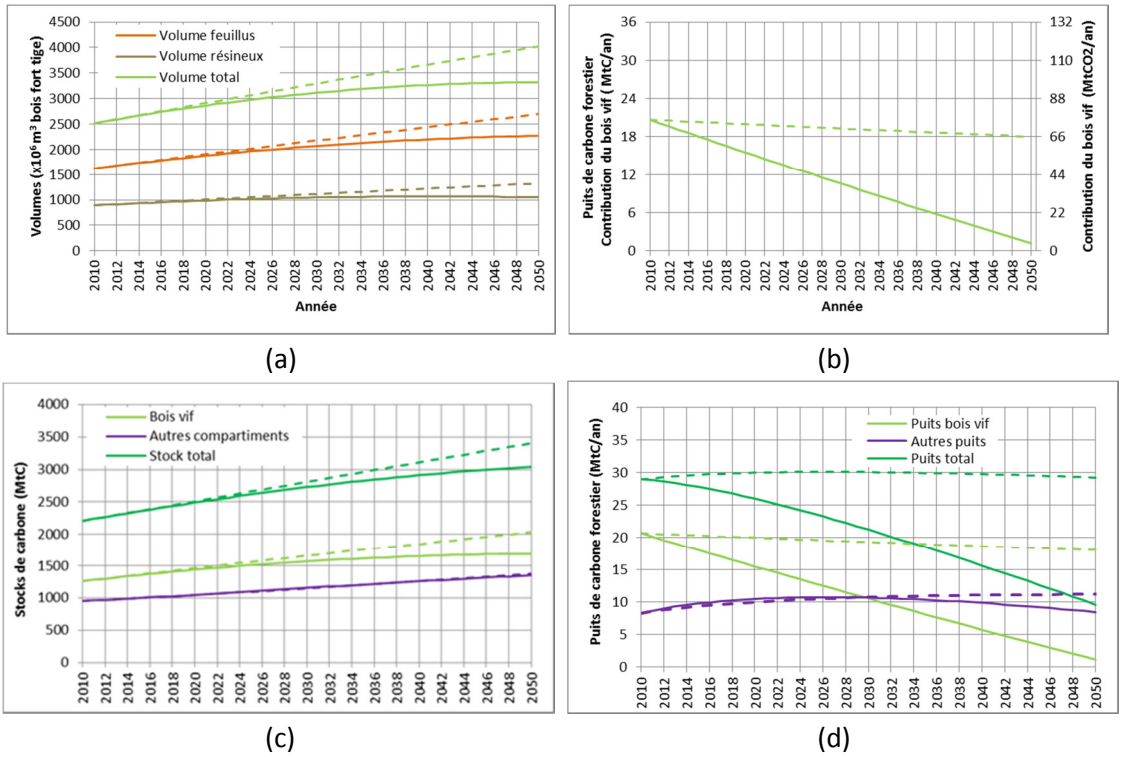
... dans l'hypothèse « basse » : $p_F = 0{,}56\times10^6\ m^3/an^2$ $p_R = 0{,}36\times10^6\ m^3/an^2$ (19)

... dans l'hypothèse « haute » : $p_F = 0{,}99\times10^6\ m^3/an^2$ $p_R = 0{,}65\times10^6\ m^3/an^2$ (20)

b) Évolutions des volumes sur pied et de la contribution des arbres vifs au puits de carbone

Les résultats obtenus en utilisant les expressions (5) et (6) pour les variations des volumes sur pied et de la contribution des arbres vifs au puits de carbone forestier sont représentés graphiquement sur les figures 13 pour l'hypothèse de prélèvement « basse » et 14 pour l'hypothèse de prélèvement « haute ». 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 (cf. synthèse par Colin et Thivolle-Cazat, 2016) projettent au-delà (jusqu'en 2050) la croissance de la demande en bois énergie.

Dans l'une et l'autre des hypothèses d'accroissement de la récolte, l'intensité du puits de carbone forestier (plus précisément ici la contribution à ce puits du stockage de carbone dans les arbres vifs) est sévèrement réduite par rapport à celle du scénario « au fil de l'eau. Dans l'hypothèse « haute », le puits de carbone 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 ligneuse, naturelle ou voulue, pouvait compenser celle des prélèvements. Cette augmentation n'est pas évidente pour le moment (cf. figure 7) et des décisions immédiates d'investissement en soins sylvicoles, boisements et reboisements ne pouvant porter leurs fruits que dans plusieurs dizaines d'années, il est permis de trouver hasardeuse la projection au-delà de 2030 de la croissance des prélèvements.



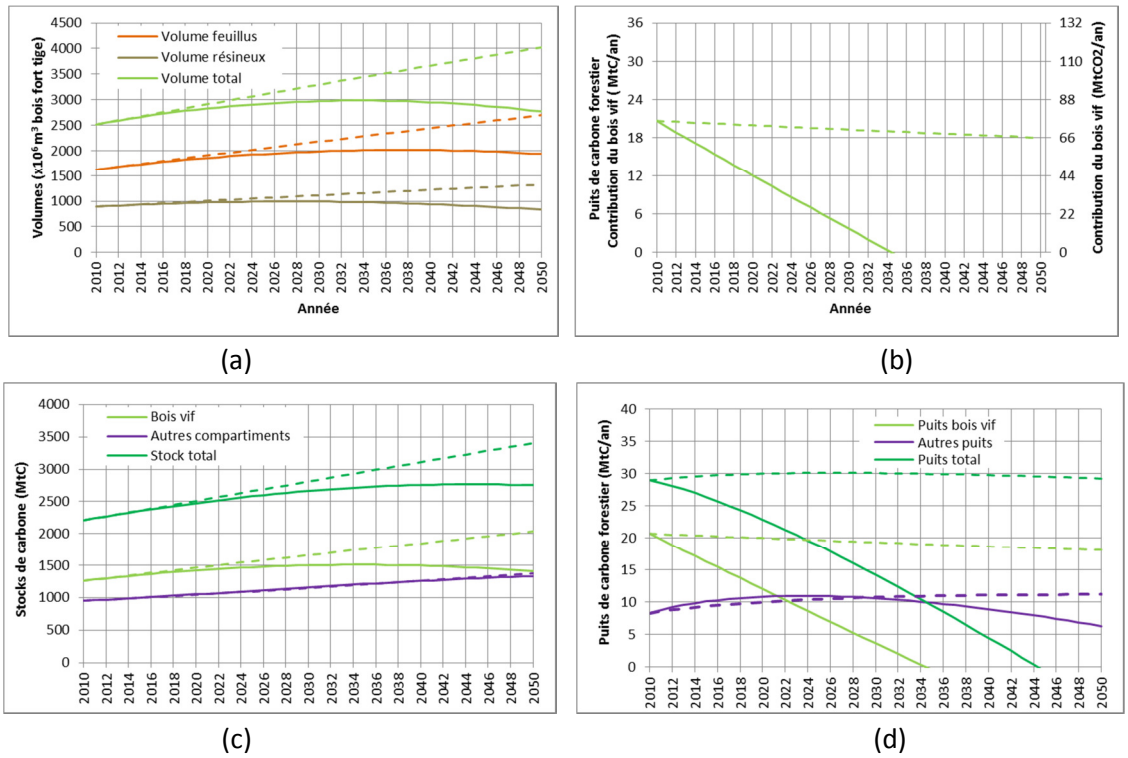
(a) (b)

(c) (d)

Figure 13 - Évolutions des volumes de bois sur pied, des stocks de carbone et des composantes du puits de carbone forestier suivant un scénario d'augmentation du prélèvement de $0{,}92\times10^6$ m^3/an^2

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

La production biologique ligneuse est supposée constante.



(a) (b)

(c) (d)

Figure 14 - Évolutions des volumes de bois sur pied, des stocks de carbone et des composantes du puits de carbone forestier suivant un scénario d'augmentation du prélèvement de $1{,}64\times10^6$ m^3/an^2

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

La production biologique ligneuse est supposée constante.

c) Conséquences d'une augmentation de récolte pour l'énergie sur l'empreinte carbone

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 et la comparaison peut se faire directement sur les stocks de carbone forestier.

Le tableau 4 récapitule, pour le scénario actuel « hypothèse basse » et pour le scénario de référence, les empreintes carbone 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). Par différence on obtient l'empreinte carbone de l'augmentation de récolte pour l'énergie. Il est alors possible de définir un facteur d'émission apparent (dernière ligne, émissions « extrinsèques » mises à part) comme le rapport, sur une période de temps donnée, entre l'empreinte carbone de l'augmentation de récolte et le contenu énergétique de celle-ci. La comparaison de ce facteur d'émission apparent aux facteurs d'émission des principaux combustibles fossiles (charbon : 1,088, pétrole : 0,833, gaz naturel : 0,638 tC/tep, cf. tableau 5 de l'annexe A) conduit alors à une conclusion sans appel : la substitution énergétique accroît les émissions au lieu de les réduire.

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 » : +0,28 Mtep/an^2 ; + 0,92×10^6 m^3/an^2 bois fort tige)

Le tableau 5 reproduit le tableau 4 dans l'hypothèse « haute » d'augmentation de récolte :

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 » : +0,5 Mtep/an^2 ; + 1,64×10^6 m^3/an^2 bois fort tige)

L'augmentation régulière du facteur d'émission apparent en fonction de la période considérée provient principalement de la décomposition des pertes à l'exploitation, ligneuses et non ligneuses, plus ou moins différée selon leur nature, et d'un déstockage partiel dans les compartiments de bois mort, dans la litière et le sol (cf. section D-2). La poursuite du scénario d'augmentation des récoltes au-delà de l'année 2050 n'aurait pas grand sens car conduisant dans les deux cas à faire de la forêt française une source de carbone (dès l'année 2044 dans l'hypothèse « haute » de prélèvement).

Comme les chiffres portés dans les tableaux 4 et 5 supposent que l'augmentation des prélèvements n'affecte pas la production biologique, et que les dispositions pour maintenir effectivement le niveau de cette production n'ont pas été prises, les facteurs d'émission apparents ont ou auront, dans la réalité, des valeurs beaucoup plus élevées encore. Ces résultats permettent de mesurer le coût carbone exorbitant des politiques actuelles 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 la section D-2, l'effet d'une variation de prélèvement (ou de production) serait le même vis-à-vis de tout autre scénario dans les limites d'approximation du modèle : linéarité, invariance.

D-5 Conserver le bois récolté ?

Le bois conservé après récolte, sous forme brute ou travaillée, ajoute son contenu carbone au stock forestier et intervient donc positivement, par rapport à un usage combustible, dans l'empreinte carbone de l'ensemble (cf. annexe B, section 1). Par ailleurs, dans nombre d'applications, le remplacement, par du « bois matériau », de béton, d'acier, d'aluminium... peut permettre des économies d'énergie et des réductions d'émission de gaz à effet de serre. Dans sa forme la mieux aboutie, dite « en cascade », la stratégie prônée par divers auteurs consiste à gérer la forêt pour y maintenir une croissance élevée, récolter le bois de manière continue, alimenter en priorité les débouchés du bois matériau, recycler les produits autant que possible et utiliser comme agent énergétique le bois usagé et les déchets de bois qui ne servent plus à d'autres fins (Taverna et coll. 2007, Alexandre 2012, Knauf et coll. 2015). Cette stratégie est remise en question, en même temps que l'usage comme combustible de la matière ligneuse :

- Le surcroît d'émission qu'implique la combustion de déchets ligneux ou produits en fin de vie, doit être pris en compte dans les bilans de substitution de produits bois à des produits réalisés avec d'autres matériaux, ce qui n'est pas fait actuellement au prétexte de « neutralité carbone ». Les valeurs actuellement avancées pour le « coefficient de substitution » rapportant au mètre cube de produit bois utilisé la masse de CO_2 « évitée » doivent donc être révisées à la baisse (cf. annexe C, section 4).

- L'empreinte carbone d'une augmentation de récolte, même lorsque celle-ci est entièrement conservée, reste négative sur des durées qui se comptent en siècles si elle n'est pas anticipée par un accroissement adéquat de production biologique (obtenu par des actions sylvicoles de rajeunissement de vieux peuplements ou des extensions du domaine boisé, par exemple) : cet accroissement doit permettre de compenser, au moins approximativement dans la durée, l'ensemble des pertes de carbone liées à l'augmentation de récolte, à la fabrication des produits, à leur fin de vie.

Enfin, pour un volume de récolte annuelle fixé, il existe une limite au stock de carbone dans les produits bois, fonction de leur durée de vie, s'ils sont brûlés au terme de leur usage, comme c'est le cas pour les déchets de fabrication. La stratégie du « bois matériau », dans l'optique actuelle de valorisation énergétique de la matière ligneuse jugée impropre à un usage durable, est illustrée par le schéma de la figure 15, où Φ_R représente le contenu carbone de la récolte annuelle (flux) et Q_P celui des produits bois en usage (stock). La proportion de la récolte utilisée directement pour l'énergie étant représentée par k_1, celle qui entre dans la filière de fabrication des produits bois est naturellement $(1 - k_1)$. En admettant par ailleurs la proportionnalité, d'une part, du flux des déchets ligneux de fabrication non recyclés à celui des bois utilisés pour la fabrication de produits, d'autre part, du flux des produits en fin de vie non recyclés au stock Q_P, on peut écrire, k_2 et $1/\tau_{vie}$ représentant les coefficients de proportionnalité respectifs :

$$\Phi_R = k_1\Phi_R + k_2(1 - k_1)\Phi_R + Q_P/\tau_{vie} + dQ_P/dt \qquad (21)$$

soit, en clair : sur une base annuelle, le contenu carbone Φ_R de la récolte ligneuse correspond à la somme de l'émission de combustion du bois directement utilisé pour l'énergie, de l'émission de combustion des déchets ligneux de fabrication, de celle des produits bois en fin de vie, et enfin de la variation du stock de carbone dans les produits bois. La notation $1/\tau_{vie}$ pour le coefficient de proportionnalité à Q_P fait apparaître la durée de vie moyenne des produits avant qu'ils ne soient devenus impropres à tout usage et servent de combustible.

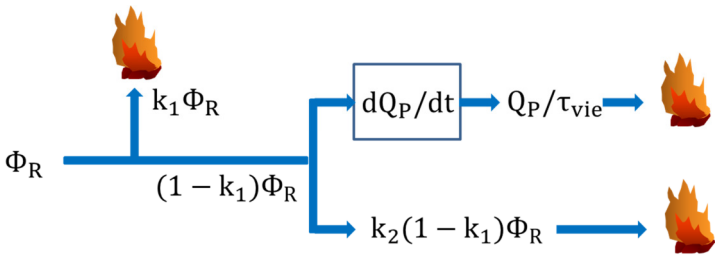


Figure 15 - Schéma simplifié des flux de carbone dans l'utilisation de la récolte, avec valorisation énergétique de la matière ligneuse impropre à un usage durable

La dérivée dQ_P/dt du stock représente le puits de carbone associé aux produits bois en usage :

$$dQ_P/dt = (1 - k_1)(1 - k_2)\Phi_R - Q_P/\tau_{vie} \qquad (22)$$

Cette expression indique qu'il ne peut y avoir stockage (dQ_P/dt >0) que si :

$$Q_P < \tau_{vie}(1 - k_1)(1 - k_2)\Phi_R \qquad (23)$$

Quel que soit Φ_R donné, il existe donc une valeur limite du stock Q_P :

$$Q_{Plim} = [(1 - k_1)(1 - k_2)]\Phi_R\tau_{vie} \qquad (24)$$

Cette limite est atteinte lorsque le flux des produits nouvellement fabriqués ne fait plus que remplacer celui des produits bois usagés ou obsolètes. Dans ces conditions, l'émission totale de combustion correspond au contenu carbone de la récolte toute entière, et les produits bois ne participent plus au puits de carbone d'ensemble [forêt + récolte].

Il serait intéressant, à l'aide des expressions (22) à (24), de situer la contribution potentielle du stockage de carbone dans les produits bois issus des récoltes ligneuses opérées dans les forêts françaises. Les données pour ce faire sont malheureusement trop fragmentaires. Aussi, mises à part celles concernant la récolte, les valeurs avancées ci-après pour les différents paramètres sont hypothétiques et ne prétendent que servir à l'illustration du propos. Le contenu carbone de la récolte Φ_R retenu pour le scénario au fil de l'eau (13,7 MtC/an) se répartit en 5,8 MtC/an dans le bois directement destiné à l'énergie et 7,9 MtC/an dans celui destiné à la fabrication de produits (bois d'œuvre et d'industrie) ; la valeur du coefficient k_1 est donc 0,42. L'augmentation du stock de carbone dans les produits bois issus de la forêt française (dQ_P/dt) pourrait être de proche de 0,9 MtC (Vial 2010). On peut estimer à 1,6 MtC/an, à partir de rares données de la littérature (dont Guinard et coll. 2015), le flux de carbone associé aux produits bois non recyclés en fin de vie (Q_P/τ_{vie}) ; le stock de carbone Q_P dans les produits bois en usage en France étant de 72,5 MtC (hors stock de bois énergie) selon le FCBA (2012), la durée de vie τ_{vie} (plus précisément le temps moyen de résidence du carbone dans les produits bois en usage compte tenu du recyclage) serait de l'ordre de 45 ans. Ces données permettent, par l'expression (22) de déterminer une valeur cohérente du coefficient k_2 :

$$k_2 = 1 - (dQ_P/dt + Q_P/\tau_{vie})/[(1 - k_1)\Phi_R] \qquad (25)$$

soit $k_2 = 0{,}68$. Les déchets d'industrie du bois représenteraient donc, dans le cadre des hypothèses adoptées, 68 % de la matière ligneuse utilisée.

Dans ces conditions, toutes choses restant égales, la limite asymptotique pour le contenu carbone des produits bois serait, d'après l'expression (24), de 115 MtC. Ce résultat n'est qu'indicatif compte tenu des incertitudes sur les valeurs des paramètres. En comparaison du stock courant, estimé à 72,5 MtC, il montre cependant qu'une augmentation du stock de carbone dans les produits bois est possible mais relativement limitée sans augmentation de récolte, dans les conditions actuelles. Or, sans avoir été anticipée par un accroissement adéquat de la production ligneuse, une augmentation de récolte se traduit longtemps par un affaiblissement du puits de carbone forestier que ne compense pas le stockage de carbone hors forêt dans les produits ligneux (cf. section D-2-2). Une volonté de séquestration du carbone dans les produits bois doit donc être accompagnée d'un effort cohérent d'amélioration des peuplements, de reboisements ou boisements. L'expression (22) indique par ailleurs dans quel sens, pour un volume de récolte donné, on doit agir pour maintenir un stockage positif dans les produits bois : diminuer la part de récolte destinée à l'énergie (k_1), diminuer aussi la part relative des déchets de bois (k_2) 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, en les recyclant ou en les conservant après usage, toutes conclusions évidentes et pourtant laissées de côté dans la pratique.

Si l'urgence climatique commandait, on devrait donc songer à proscrire toute utilisation énergétique de matière ligneuse, favoriser la croissance forestière, ne pas obérer cette croissance par des prélèvements excessifs et stocker, dans des conditions propres à assurer leur conservation, les bois qui se révèlent impropres à une utilisation durable (y compris les déchets ligneux de fabrication et les produits bois en fin de vie).

On peut objecter que le bois récolté est promis à décomposition et rendra de toute façon son carbone à l'atmosphère, qu'on le brûle ou non ; cet argument n'est pas dénué de sens mais fait abstraction du degré d'urgence de la réduction des émissions de CO_2 : il suffit de comparer le temps qui nous sépare des échéances climatiques, quelques dizaines d'années seulement , et la durabilité des bois bruts on travaillés, plusieurs siècles sinon millénaires s'ils sont placés à l'abri de l'humidité et des insectes xylophages. C'est une évidence pour le bois d'œuvre, comme en témoignent les charpentes et menuiseries de nos vieux bâtiments et l'usage que font, durant des générations, les meubles en bois massif. Cependant, si rien n'empêche, par une bonne gestion de la forêt, de privilégier la production de bois d'œuvre ou, à défaut, d'industrie, se pose la question du devenir des bois jusqu'à présent destinés à l'énergie, des déchets ligneux de fabrication et des produits bois en fin de vie. Une fois épuisées les solutions de réemploi et de recyclage, reste la possibilité de l'enfouissement de la matière ligneuse impropre à tout usage durable ou même de celui du bois brut dans une perspective de géo-ingénierie du climat (Zeng, 2008) : 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 (Micales et Skog 1997). On trouvera dans la référence (Leturcq 2014) une première analyse de l'impact climatique de la décomposition progressive des bois conservés en fonction des constantes de temps de leur dégradation. Cependant, la séquestration du carbone par conservation de la matière ligneuse récoltée peut n'être que temporaire : dans un avenir pas trop lointain, des techniques telles que le CCS (Carbon dioxide Capture and Storage qui consiste à séparer le CO_2, à sa source, des autres gaz de combustion, et à l'injecter dans des formations géologiques telles que gisements épuisés de gaz ou de pétrole, aquifères salins profonds...), si elles deviennent matures, permettraient de réutiliser, cette fois comme combustible, la matière ligneuse stockée, avec moindre impact sur le climat (IPCC 2005).

D-6 Conclusions

Selon que la production annuelle **nette** de la forêt, en termes de flux de carbone, est inférieure ou supérieure à l'émission résultant de l'usage du bois récolté, l'ensemble de la forêt et de l'utilisation de son bois se comporte en puits ou en source de carbone vis-à-vis de l'atmosphère. L'intensité de ce puits ou de cette source (différence entre flux annuels capté et émis) est essentiellement variable dans le temps, et il en est de même de l'empreinte carbone qui en est la sommation sur une période de temps choisie. Cette empreinte carbone est représentée par la modification des stocks de carbone en forêt et dans les produits ligneux issus de la récolte, sur la période de temps considérée. Pour faire jouer à la forêt et l'utilisation de son bois un rôle positif dans l'atténuation de l'effet de serre, il faut donc que la somme de ces stocks s'accroisse. L'effet de toute action en ce sens peut s'apprécier en comparant l'évolution de ces stocks (i .e. celle de l'empreinte carbone) à ce que serait cette évolution en l'absence d'action (évolution de référence). Le problème, au premier abord, paraît complexe. Cependant, en admettant que le temps τ de résidence, de transit, ou de renouvellement du carbone dans chacun des compartiments forestiers (bois vif, bois mort, litière, sol...) est constant, la forêt et l'utilisation de son bois peuvent être considérés, du point de vue de la dynamique du carbone, comme deux systèmes linéaires invariants couplés par la récolte de bois. Dans ce cadre d'approximation, l'ensemble des propriétés des systèmes linéaires invariants s'applique ; l'effet recherché est indépendant de l'évolution de référence, celle-ci n'a donc pas besoin d'être précisée,

et la propriété de superposition des solutions permet de limiter l'analyse à des actions simples, ce qui simplifie les raisonnements et confère leur généralité aux conclusions :

- Quelle que soit l'évolution de la forêt, naturelle ou planifiée, 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 τ. Celle-ci se trouve être le temps moyen de résidence du carbone dans les arbres vifs, hors prélèvement, et se compte en siècles.

- La récolte de bois s'accompagne de pertes d'exploitation, aériennes et racinaires, ligneuses et non ligneuses, et d'un déstockage de carbone dans les compartiments forestiers privés des apports de carbone qui leur parvenaient des arbres exploités. Elle entraîne aussi généralement une diminution transitoire de production biologique, sauf mesures sylvicoles permettant de maintenir ou d'améliorer cette dernière. Aussi, une augmentation de récolte, toutes choses égales par ailleurs, se traduit-elle toujours négativement (émission) sur l'empreinte carbone si le bois est utilisé comme combustible, de manière positive lorsque le bois est conservé, mais après un délai suivant récolte qui se compte en siècles. En augmentant la production biologique, on peut compenser à la fois 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 noter 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 à l'empreinte carbone, d'autant mieux que cette réduction porte sur du bois qui était primitivement destiné à l'énergie.

Dans son état actuel (référence aux données IGN rapportables à l'année 2010), la forêt française est un puits de carbone d'environ 29 MtC/an, les filières d'utilisation des bois n'apportant qu'une contribution négligeable au puits de carbone total (moins de 1MtC/an) car l'essentiel de la récolte (13,7 MtC/an) est vouée, dans les usages présents, à combustion ou à décomposition. Même si les prospectives, en matière forestière, sont toujours hasardeuses, il est intéressant de dérouler des scénarios d'évolution de la forêt selon diverses hypothèses d'intensité des prélèvements et d'utilisation des bois récoltés et comparer les empreintes carbone correspondantes :

- 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 en 2050 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 2034 dans le second, sous réserve encore que la production biologique ne soit pas affectée. Se pose donc aussi la question de la compatibilité des objectifs de récolte avec la pérennité de la forêt.

- 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. Il est alors possible de définir un facteur d'émission apparent (émissions « extrinsèques » mises à part) comme le rapport, sur une période de temps donnée, entre l'empreinte carbone de l'augmentation de récolte et le contenu énergétique de celle-ci. Ce facteur d'émission apparent est variable selon la période de temps considéré et l'évolution du prélèvement. Dans le cas d'une augmentation ponctuelle de récolte, sa valeur est initialement celle du facteur d'émission intrinsèque (1,13 tC/tep), augmente pour culminer à ≈ 2 tC/tep un demi-siècle environ après récolte pour décroître ensuite. Dans les scénarios de croissance linéaire de prélèvement pour l'énergie envisagés plus haut, ce facteur d'émission apparent augmente aussi en fonction de la période de temps concernée, 1,34 tC/tep sur une période de 10 ans après le début de l'augmentation, 1,63 tC/tep sur une période de quarante ans. Ces valeurs sont largement supérieures à celle du facteur d'émission de tout autre combustible, rendant vaine l'idée d'une réduction d'émission par substitution.

- Sans avoir été anticipée par un accroissement adéquat de la production ligneuse, une augmentation de la récolte se traduit par un affaiblissement du puits de carbone forestier que ne compense en aucun cas le stockage hors forêt dans les produits ligneux. Par contre, il est possible, pour un volume de récolte donné, d'orienter l'utilisation des bois vers un 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, 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.

- Il est toujours envisageable, dans une perspective de géo-ingénierie du climat, de récolter des bois impropres à un usage durable, sous réserve d'adaptation de la production biologique, et de les stocker dans des conditions propres à assurer leur conservation, notamment par enfouissement.

Références bibliographiques

AGRESTE (2016) Enquête annuelle de branche exploitation forestière. Récolte de bois en France métropolitaine de 2005 à 2015

Alexandre S (2012) Forêt et climat : enjeux et politiques publiques. Innovations Agronomiques 18, pp. 1-15

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

CITEPA (2014) Inventaire des émissions de polluants atmosphériques et de gaz à effet de serre en France – Format SECTEN © CITEPA 2014

Colin A (2014) Emissions et absorptions de gaz à effet de serre liées au secteur forestier dans le contexte d'un accroissement possible de la récolte aux horizons 2020 et 2030. Convention MEDDE.DGEC / IGN n°2200682886 (IGN n°10998), Rapport final, mars 2014, IGN

Colin A et Thivolle-Cazat A (2016) Disponibilités forestières pour l'énergie et les matériaux à l'horizon 2035. Tome 1 : Rapport. Étude ADEME/IGN/FCBA, février 2016

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

Guinard L, Deroubaix G, Roux M-L, Levet A-L, Quint V (2015) Évaluation du gisement de déchets bois et son positionnement dans la filière bois/bois énergie. Étude réalisée pour le compte de l'ADEME, FCBA, avril 2015

IPCC (2005) IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. Prepared by Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Metz, B., O. Davidson, H. C. de Coninck, M. Loos, and L. A. Meyer (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 442 pp.

Knauf M, Köhl M, Volker M, Olschofsky K and Frühwald A (2015) Modeling the CO_2-effects of forest management and wood usage on a regional basis. Carbon Balance and Management (2015) 10:13

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

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

Map et IFN (2006) Les indicateurs de gestion durable des forêts françaises, édition 2005

MEDDE (2013) Le facteur 4 en France : la division par 4 des émissions de gaz à effet de serre à l'horizon 2050, Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie, Conseil général de l'environnement et du développement durable, rapport n° : 008378-01, février 2013

Micales J A and Skog K E (1997) The decomposition of forest products in landfills. International Biodeterioration & Biodegradation, vol. 39, n°2-3, 1997, pp.145-158.

Plan d'action national en faveur des énergies renouvelables (2010), période 2009-2020, en application de l'article 4 de la directive 2009/28/CE de l'Union européenne.

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, doi: 10.1111/j.1365-2486.2004.00866.x

Taverna R, Hofer P, Werner F, Kaufmann E, Thürig E (2007) The CO2 Effects of the Swiss Forestry and Timber Industry. Scenarios of future potential for climate-change mitigation. Environmental studies no. 0739. Federal Office for the Environment, Bern 2007

Vial E (2010) Comptabilisation du carbone dans les produits bois en France, Copyright FCBA INFO, Décembre 2010

Zeng N (2008) Carbon sequestration via wood burial. Carbon Balance and Management 3:1, January 2008.

APPENDICE E : Quelques notions mathématiques élémentaires

« En mathématiques, on ne comprend pas les choses, on s'y habitue»
(John von Neumann)

Cette appendice rassemble quelques notions élémentaires d'analyse des systèmes linéaires invariants, ou, ce qui revient au même, quelques propriétés des équations différentielles linéaires à coefficients constants. On se limite au premier ordre, ce qui est nécessaire et suffisant pour la compréhension des arguments utilisés dans le texte principal et les annexes C et D.

Par raison de conservation (loi de Lavoisier), pour chacun des compartiments forestiers identifiés dans le schéma de la figure 1, 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 le flux annuel $\Phi_{\mathbf{e}}$ entrant et le flux annuel sortant $\Phi_{\mathbf{s}}$. De plus, en première approximation, le flux sortant $\Phi_{\mathbf{s}}$ peut être exprimé comme le rapport du stock Q au temps τ de transit (ou de résidence ou de renouvellement) du carbone dans le compartiment considéré (figure 1 a). Si on envisage l'évolution du système sur une période de plusieurs années, il est plus commode, pour faciliter les développements, 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 1 b).

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

(a) (b)

Figure 1 - Représentation approchée linéaire au premier ordre de la dynamique d'un système obéissant à une loi de conservation.

Dans ces conditions, l'évolution du stock Q(t) est solution de l'équation différentielle du premier ordre :

$$dQ/dt + Q/\tau = \Phi_{\mathbf{e}}(t) \qquad (1)$$

Pour une variation quelconque du flux d'entrée $\Phi_{\mathbf{e}}(t)$, cette solution s'écrit, en admettant que τ est constant :

$$Q(t) = \left\{Q_0 + \int_0^t \Phi_e(t')\exp(t'/\tau)\,dt'\right\}\exp(-t/\tau) \qquad (2)$$

où Q_0 est la valeur du stock à l'origine des temps choisie $t = 0$:

Ainsi, pour un flux entrant :

$$\Phi_e(t) = a + bt + c\exp(\alpha t) \qquad \text{avec} \quad \alpha > 0 \qquad (3)$$

dont la forme est générique pour les objectifs des annexes C et D, l'évolution du stock de carbone dans le compartiment concerné a pour expression :

$$Q(t) = Q_0\exp(-t/\tau) + a\tau[1 - \exp(-t/\tau)] + b\tau\{t - \tau[1 - \exp(-t/\tau)]\} \qquad (4)$$
$$+\frac{c\tau}{1+\alpha\tau}[\exp(\alpha t) - \exp(-t/\tau)]$$

La dérivée de l'évolution du stock s'écrit :

$$dQ/dt = -\frac{Q_0}{\tau}\exp(-t/\tau) + a\exp(-t/\tau) + b\tau[1 - \exp(-t/\tau)] \qquad (5)$$
$$+\frac{c\tau}{1+\alpha\tau}\left[\alpha\exp(\alpha t) + \frac{1}{\tau}\exp(-t/\tau)\right]$$

Cette dérivée représente la contribution du compartiment considéré au puits de carbone forestier (stockage de carbone).

Ces écritures sont « brutes » pour laisser apparente la correspondance de leurs différents termes avec ceux de l'expression du flux d'entrée. Le flux sortant $\Phi_s(t)$ s'obtient, comme indiqué sur la figure 1 b, en divisant $Q(t)$ par le temps de transit du carbone dans le compartiment.

Le résultat (4) peut être analysé comme suit : les termes exponentiels de constante de temps τ composent la réponse dite « libre » à l'excitation $\Phi_e(t)$; pour les temps « longs » (t supérieur à quelques unités de τ), ces termes tendent à s'annuler et reste alors la réponse « permanente » ou « forcée » imposée par l'excitation:

$$Q(t)|_{\text{forcé}} \approx a\tau + b\tau(t - \tau) + \frac{c\tau}{1+\alpha\tau}\exp(\alpha t) \qquad (6)$$

Les figures 2 pour l'excitation (flux d'entrée) et 3 pour la réponse (évolution du stock) illustrent cette conception avec les valeurs suivantes de paramètres :

$$\alpha = 0{,}01 \qquad \tau = 10 \qquad a = 2 \qquad b = 0{,}05 \qquad c = 10 \qquad Q_0 = 250$$

Il est important de remarquer que si la condition initiale Q_0 coïncide avec la valeur de la réponse forcée pour $t = 0$, soit ici Q_0 =105,91, la réponse libre s'annule quel que soit t en sorte que la réponse $Q(t)$ est forcée dès l'origine.

Réciproquement, si le système considéré (le compartiment) se trouve d'emblée, pour $t = 0$, en régime permanent vis-à-vis d'une excitation Φ_e appliquée antérieurement à l'origine des temps

choisie (d'au moins quelques unités de τ), c'est que le stock initial Q_0 est égal à la valeur de la réponse forcée pour $t = 0$ soit, dans le cas particulier du flux entrant d'expression (3) :

$$Q_0 = a\tau - b\tau^2 + \frac{c\tau}{1+\alpha\tau} \tag{7}$$

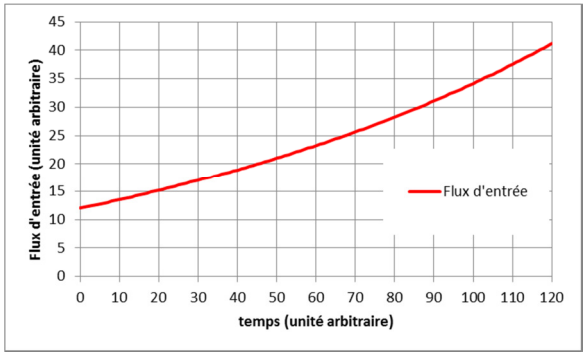


Figure 2 - Flux d'entrée (« excitation »)

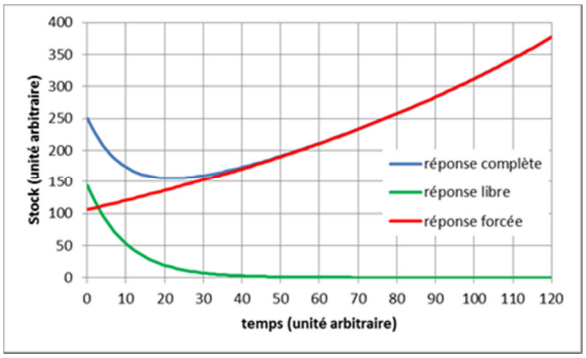


Figure 3 - Évolution du stock (« réponse »)

En ce qui concerne la dérivée dQ/dt du stock, on distingue, de la même manière, une réponse libre et une réponse forcée dont la somme à chaque instant représente la réponse réelle. La figure 4 en donne l'illustration avec les mêmes valeurs de paramètres:

$$\alpha = 0{,}01 \qquad \tau = 10 \qquad a = 2 \qquad b = 0{,}05 \qquad c = 10 \qquad Q_0 = 250$$

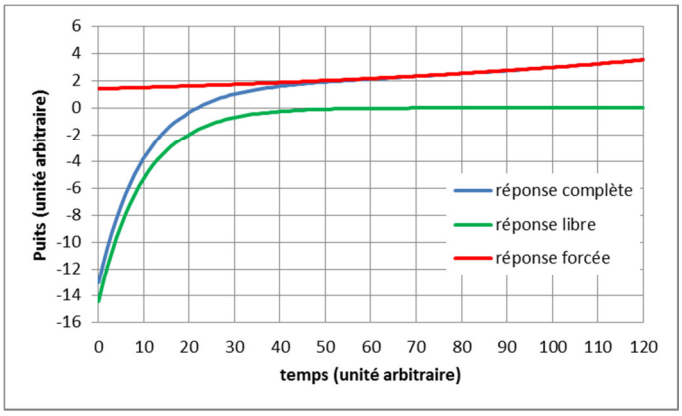


Figure 4 - Évolution du puits (« réponse »)

En régime permanent on a :

$$dQ/dt|_{\text{forcé}} = b\tau + \frac{c\tau\alpha}{1+\alpha\tau}\exp(\alpha t) \tag{8}$$

et, dans le cas où le système est forcé dès l'origine des temps choisie :

$$dQ/dt|_{t=0} = b\tau + \frac{c\tau\alpha}{1+\alpha\tau} \tag{9}$$

($dQ/dt|_{t=0} = 1{,}41$ avec les valeurs numériques de l'exemple).