

Le carbone forestier en mouvements

Éléments de réflexion pour une politique
maximisant les atouts du bois



© Magali Rossi

2015

Magali Rossi

En collaboration avec Jean André et Daniel Vallauri



La conservation des forêts est un des premiers intérêts des sociétés, et par conséquent l'un des premiers devoirs des gouvernements. Tous les besoins de la vie se lient à cette conservation. [...] Nécessaires aux individus, les forêts ne le sont pas moins aux Etats. [...].

Ce n'est pas seulement par les richesses qu'offre l'exploitation des forêts sagement combinée qu'il faut juger de leur utilité. Leur existence même est un bienfait inappréciable pour les pays qui les possèdent, soit qu'elles protègent et alimentent les sources et les rivières, soit qu'elles soutiennent et raffermissent les sols des montagnes, soit qu'elles exercent sur l'atmosphère une heureuse et salubre influence.

***Extrait du discours du Comte de Martignac à la Chambre,
lors de la présentation du Code forestier de 1827***

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier pour leur relecture attentive et leurs remarques constructives :

- Jean-Michel Boissier, tout particulièrement pour la partie consacrée au sol,
- Bruno Ferry, également pour la partie sol et pour l'évolution des écosystèmes forestiers en lien avec le changement climatique,
- Philippe Lebreton, pour sa connaissance globale du sujet et ses précisions quant à la biochimie de sols,
- Yves Le Jean, pour sa vision de forestier de terrain apportant un angle de vue complémentaire,
- Kévin Harang pour son éclairage sur la partie consacrée à la substitution,
- François-Xavier Nicot, pour le temps consacré à ce rapport, notamment à la modélisation des scénarii sylvicoles, en veillant à ce que les enjeux multiples de la forêt soient considérés le plus objectivement et équitablement possible.

Citation conseillée

Rossi M., André J., Vallauri D., 2015. Le carbone forestier en mouvements. Éléments de réflexion pour une politique maximisant les atouts du bois. Lyon, Rapport REFORA, 40 pages.

Résumé exécutif

Les stocks de carbone de l'écosystème forestier

Le carbone est stocké dans la biomasse (aérienne et souterraine) à raison de 1 147 MtC pour l'ensemble de la forêt française métropolitaine, et dans le sol, qui représente près de la moitié du stock total avec 1 074 MtC. Le carbone du sol est présent sous différentes formes, de molécules très labiles, facilement dégradées comme la cellulose, à des molécules complexes qui peuvent stocker le carbone pendant des centaines à des milliers d'années.

La biomasse stocke le carbone via sa partie aérienne (35 % du stock total) et souterraine (11 % du stock total). Les arbres de gros diamètre constituent des stocks importants (tronc, branches, grosses racines).

Les flux de carbone en forêt

Les écosystèmes forestiers français métropolitains captent annuellement par la photosynthèse l'équivalent d'un tiers des émissions de CO₂ françaises, soit 32 MtC/an. Toutefois, 63 % de cet accroissement est prélevé chaque année, et une partie seulement est stockée de façon durable sous forme de produits bois.

Comment la sylviculture influence-t-elle sur le stockage du carbone en forêt ?

L'âge du peuplement, défini par la durée du cycle sylvicole en forêt gérée, est déterminant pour le stockage du carbone. Si l'on cherche à maximiser le stock de carbone dans l'écosystème forestier, l'allongement des cycles sylvicoles est le meilleur choix de gestion. Il permet également d'optimiser la production de gros bois d'œuvre de qualité, économiquement intéressant pour le propriétaire. Chercher à gérer les forêts en recherchant à maximiser systématiquement l'accroissement annuel et en raccourcissant les cycles sylvicoles ne permet pas, dans le cas général, d'augmenter les stocks de carbone en forêt. Par ailleurs, ce type de sylviculture ne valorise économiquement pas les bois au mieux.

Le choix de l'essence est important, car si les résineux stockent plus rapidement le carbone durant les premières années de vie du peuplement, la tendance s'inverse ensuite et les peuplements feuillus sont plus efficaces en termes de stockage de carbone sur le moyen à long terme.

Un peuplement multistratifié aura un meilleur stockage de carbone, grâce à l'interception par les strates basses du carbone relargué par le sol. Cette complexité structurale est par ailleurs favorable tant pour la stabilité et la résilience des peuplements, que pour la biodiversité.

Les stocks de carbone les plus élevés en France sont localisés dans les futaies à cycle sylvicole long (pour la plupart des forêts anciennes), notamment les futaies feuillues du quart Nord-Est de la France.

Chiffres clés

(forêt française métropolitaine)

Superficie **16 millions d'ha**

Volume sur pied **2 547 Mm³**

Stock de carbone total des forêts **2 211 MtC**

dont biomasse 1 147 MtC

dont sol 1 074 MtC

Accroissement biologique annuel **86,7 Mm³**

Équivalent carbone 32 MtC

Volume prélevé annuellement **56 Mm³**

Équivalent carbone 20 MtC

Le carbone dans les produits bois en France métropolitaine

Le stock de carbone contenu dans les produits en bois situés sur le territoire français métropolitain représentaient environ 85 MtC en 2008. L'équivalent carbone du volume de bois récoltés chaque année dans la forêt française représente 20 MtC/an. Ces stocks et accroissement annuel ne sont toutefois pas additionnables.

Au risque de rendre inopérante toute politique en faveur d'un usage renforcé du bois, il est utile de considérer le cycle de vie complet des produits bois, et le réel gain, en termes d'émissions, du fait de la substitution par le bois de matériaux plus consommateurs d'énergie fossile pour leur fabrication (acier, plastique, béton).

La durée de vie d'une charpente une fois montée est par exemple de 40 ans (durée d'utilisation moyenne). Le calcul des durées de vie apparente tient compte des rendements des industries de première et de deuxième transformation. Ainsi, la durée de vie apparente d'un produit de construction bois (charpente, couverture) sera de 9 ans. 51 % du volume exploité en forêt est en effet perdu (bois énergie, papier) lors de la première transformation, puis 20 % sont à nouveau perdus lors de la seconde transformation. La durée de vie apparente tient compte à la fois de la durée de vie du produit fini (40 ans pour une charpente), relativement au volume utilisé (40 %), et de la durée de vie des pertes (1 à 2 ans pour le bois énergie ou le papier).

Seule la part de la récolte dédiée à la filière Bois d'œuvre stocke durablement le carbone dans les produits, or elle ne représente que 32 % de la récolte totale (commercialisée et autoconsommation) en France. Les pertes étant importantes au fil de la transformation du bois, seuls 9 Mm³ entrent finalement dans la 2nde transformation. Le stock de carbone contenu dans les produits bois ne s'accroît ainsi pas de façon linéaire et directe, telle que vue par les volumes exploités en forêt.

Le bois joue toutefois un rôle intéressant pour se substituer à des matériaux consommateurs d'énergies fossiles pour leur fabrication (acier, plastique, béton). L'effet positif de la substitution due à l'usage du bois comme matériau équivaldrait à 3,2 MtC/an en France. Ce calcul prend en compte le bois d'œuvre et le bois destiné aux panneaux (soit un total de 22 Mm³ en entrée de filière et de 15 Mm³ après transformations). Le taux de rentabilité en termes de carbone de cette substitution est donc de 22 %.

Pour le bois énergie, le taux de rentabilité carbone n'est que de 16 % : la substitution par le bois d'énergies fossiles équivaldrait à une économie de 5 MtC/an pour 31 Mm³ récoltés. Cependant, calculer le bénéfice d'un point de vue des émissions de CO₂ implique un strict remplacement et non additionnalité des émissions (remplacement d'autres énergies et non consommation supplémentaire). De plus, il est indispensable, au risque d'un raisonnement faux, de considérer la durée de vie des produits bois (1 an pour le bois énergie), et la nécessaire hiérarchie à instaurer entre les usages (bois d'œuvre > bois d'industrie > bois énergie).

Chiffres clés

(Filière bois française)

Part de la récolte totale destinée à la filière bois d'œuvre **32 %**

Volume de bois d'œuvre sortant de la 1^{ère} transformation **9 Mm³**

Durée de vie apparente d'un produit bois construction **9 ans**

Stock de carbone dans les produits bois sur le territoire français (2008) **85 MtC**

Effet de substitution de l'utilisation du bois comme matériau **3,2 MtC** (rendement 22 %)

Effet de substitution de l'utilisation du bois comme énergie **5 MtC** (rendement 16 %)

Recommandations pour une gestion durable

Pour mener une gestion forestière efficiente en termes de stockage du carbone, tout en considérant les aspects économiques, écologiques et sociaux cruciaux, nous recommandons notamment de :

- **Concilier le stockage de carbone et les autres enjeux des forêts**

Une politique forestière équilibrée doit chercher à répondre à la fois :

- à la demande des usagers et consommateurs,
- à optimiser à la fois les gains des propriétaires, la valeur ajoutée pour l'industrie transformatrice, et l'emploi local,
- à optimiser le rôle de la forêt et des produits bois dans l'objectif de réduction des émissions de CO₂,
- conserver l'outil de production, l'écosystème forestier, sa biodiversité et naturalité, si précieuses pour s'adapter au fil des ans aux changements climatiques.

- **Conserver une trame de vieux bois en libre évolution**

Ces différents réservoirs de biodiversité sont nécessaires à la survie de la biodiversité aujourd'hui ; ils sont indispensables pour l'adaptation des forêts aux changements climatiques (augmentation de la résilience dans les territoires) ; ils sont autant de stocks de carbone conservés ou restaurés en forêt et dans leur sol.

Le projet FRENE de la région Rhône-Alpes va tout à fait dans ce sens, en promouvant la libre évolution d'un minimum de 10 % des forêts du territoire rhônalpin.

- **Faire les bons choix sylvicoles**

Pour être efficace en terme de carbone comme de biodiversité et de rentabilité économique, les sylvicultures gagnent à :

- allonger les cycles sylvicoles,
- éviter les coupes rases et de préférer les interventions prudentes et continues,
- conserver bois mort et rémanents en forêt,
- favoriser le mélange des essences,
- privilégier les traitements irréguliers à couvert continu.

- **Fonder sur les forêts une économie durable à faible empreinte carbone**

Le déficit de la balance commerciale de la filière bois s'élevait en 2012 à 3 à 7 milliards d'€ selon que l'on considère ou non la filière Ameublement. En tout état de cause, les soldes commerciaux sont particulièrement négatifs pour les produits à forte valeur ajoutée (ameublement, sciages, charpente et menuiseries, autres produits bois). Pour parvenir à rééquilibrer la balance commerciale de la filière bois française, il semble donc préférable de transformer mieux, c'est à dire de créer de la valeur ajoutée sur la seconde transformation et au-delà, plutôt que d'exploiter plus. Une réflexion particulière sur l'économie circulaire dans les filières forestières et les avantages de celles-ci en termes de bilan carbone est nécessaire.



Executive summary

Carbon stocks in forest ecosystem

Carbon stock in biomass (above and below ground) reaches 1 147 MtC for the entire forest area of the mainland, and soils represent almost half of the total stock with 1 074 MtC. The forms of carbon in soil include labile molecules, easily degraded like cellulose, and complex molecules that could fix carbon for centuries to millennia.

Carbon in biomass is above-ground (35 % of total stock) and below ground (11 % of total stock). The very large trees retain important carbon stock (trunk, branches, big roots).

Carbon fluxes in forest ecosystem

The forest ecosystems of mainland France capture annually through photosynthesis the equivalent of one third of French CO₂ emissions, i.e. 32 MtC/y. However, 63 % of this annual increment is harvested, and only one part of it integrates a long term carbon stock through wood products.

How silvicultures influence forest carbon stock?

Forest stand age, defined as the duration of the managed forest cycle, is crucial for carbon stock. In search of maximizing carbon stock of the forest ecosystem, the increase of this duration is the best management choice. This optimises the production of good quality wood from large trees, a solution economically interesting for forest owners. Looking after the harvest of total annual biological increment or reducing the duration of the managed forest cycle do not allow, in general, the increase of forest carbon stocks. Furthermore, this type of silviculture does not allow the best economical valorisation of wood capital for forest owners.

The choice of main tree species is important: if conifers capture carbon faster during the first decades of forest stand cycle, broadleaved forest stands tend to be more efficient in term of carbon stock in medium to long run.

A multi-stratified forest stand would have a higher carbon stock, thanks to under-layers interception of soil carbon emissions. Structural complexity is more over positive for forest stand stability and resilience, and also for its biodiversity.

The higher carbon stocks in France are in high forest stands managed according to long cycle (that are also very often forest with a certain degree of ancientness), among others broadleaved forest stands in the North-Eastern part of France.

Key figures

(French forests without overseas territories)

Forest area **16 million ha**

Above-ground wood stock **2 547 Mm³**

Carbon stock of forests (total) **2 211 MtC**

- Including biomass **1 147 MtC**

- Including soil **1 074 MtC**

Annual Biological Increment **86,7 Mm³**

Carbon equivalent **32 MtC**

Annual Harvested Volume **56 Mm³**

Carbon equivalent **20 MtC**

Carbon in wood products in mainland France

Carbon stock in wood products located in mainland France was evaluated equal to +/- 85 MtC in 2008. Each year, French harvested wood correspond to 20 MtC/y. However, these stock and annual increment cannot be sum up.

To be correct, and to properly promote the real advantages of wood uses, it is necessary to consider the complete life cycle of forest products, and the real gain in terms of emissions their uses represents due to substitution of other materials (steel, plastic, concrete).

The duration of life cycle of a wood frame is about 40 years (mean use duration). Calculation of apparent life duration take into account the efficiency of first and second industrial transformation. Thus, apparent life duration of a wood building (frame, roof) would be 9 years only. 51 % of the harvested volume is 'lost' during first transformation (waste used for energy or paper), then 20 % more are 'lost' during second transformation. The apparent life duration take into account either the duration of the end product (40 years for a frame), in relation with the volume used (40 %), and the duration of the life of 'waste' (1 or 2 years for energy or paper).

Only the harvested wood used as lumber is taking part in a long term stock of carbon of wood products ; this part is equal to 32 % of total harvest (commercial and self-consumption) in France. Waste are important along transformation process, only 9 Mm³ enter in 2nd transformation. Thus, the carbon stock of wood products is not increasing following a linear and direct relation to the increase of harvested wood volume.

Nevertheless, wood plays an important role as a substitute to other materials consuming more energy for their production (steel, plastic, concrete). The positive impact of substitution by wood could be 3,2 MtC/year in France. This calculation takes into account lumber and panels (i.e. a total of 22 Mm³ entering in wood industry and 15 Mm³ after transformations). Carbon efficiency of substitution by wood is equal to 22 %.

For fuel wood, carbon efficiency is only 16 % : substitution of fossil fuels could be equal to an economy of 5 MtC/year for 31 Mm³ harvested. However, to calculate such a positive effect would require proving the strict replacement of CO₂ emissions and not that fuel wood emissions are simply added (replacement of other energies and not additional consumption). Furthermore, it is required to consider the real duration of the life of the products (1 year for fuel wood), that leads to an obvious hierarchy of wood uses (lumber > industrial wood > fuel wood).

Key figures (French wood industry)

Harvest part used for lumber **32 %**

Volume of harvested wood used for lumber after 1st transformation **9 Mm³**

Apparent life duration of a wood building **9 ans**

Carbone stock in wood products in mainland France (2008) **85 MtC**

Substitution effect of wood like material **3,2 MtC** (output 22 %)

Substitution effect of wood like energy **5 MtC** (output 16 %)

Recommendations for sustainable management

To efficiently manage forests on a carbon stock point of view, while taking into account economical, ecological and social considerations, we recommend:

- **Combine carbon stock with the other stakes of forest management**

A balanced forest policy must look after:

- Demands from consumers and users of forest lands,
- Optimise gains for forest owners, added value for wood industry and local employment,
- Optimise the role of forests and forest products to contribute to the target of CO₂ emission reduction,
- Conserve a productive capital, the forest ecosystem, its diversity and naturalness that are so precious to for forest adaptation to climate changes.

- **Preserve a green infrastructure through a network of mature & unharvested forest islands**

These areas are important for biodiversity and the survival key species; they are compulsory for forest adaptation to climate changes (increase of resilience at landscape level); they are also areas with high carbon stocks, protected or restored (soil and forest stand).

The FRENE program in the Rhône-Alpes region is clearly contributing to this target, by promoting protection of forest islands up to 10 % of the forest of the region.

- **Making good silvicultural choices**

To be efficient in term of carbon, as well as for biodiversity and economic viability, silvicultures should aim at:

- Lengthen harvesting cycles,
- Avoid clear-cuttings and prefer progressive and careful interventions,
- Conserve deadwood and harvesting residues on the ground,
- Mix tree species as much as possible,
- Promote unevenaged silvicultures.

- **Fund on forest resources a new forest-green & low carbon footprint economy**

The deficit of the trade balance of French wood industry was reaching in 2012 from 3 to 7 billion €, depending if it considers or not furnishing. In any case, trade balances are negative for wood products that have the highest added value (furniture, lumber, carpentry, and other wood products). To reverse the chronic disequilibrium of the French wood trade balance, it is required to better transform the wood harvested in France, and thus to create more added value during second transformation and beyond, rather than to harvest more. A specific exploration of circular economy principles in wood industries, and their benefits in terms of carbon would produce positive results.

Sommaire

Introduction	1
Partie 1. Comprendre le carbone en forêt	2
Des données françaises résultant d'une histoire forestière ancienne	2
Les stocks de carbone de l'écosystème forestier	2
<i>Le stock de carbone souterrain</i>	<i>3</i>
<i>Le stock de carbone dans la biomasse</i>	<i>7</i>
Les flux de carbone en forêt	8
Les changements climatiques modifient-ils le cycle naturel du carbone ?	10
<i>Vers une restauration du carbone dans les forêts rhônalpines</i>	<i>11</i>
Partie 2. Comment la sylviculture influence-t-elle le stockage du carbone ?	12
Age et durée des cycles sylvicoles	13
Choix de l'essence objectif	17
Structure du peuplement	18
Coupes rases et définitives	19
Éclaircies : intensité et fréquence	19
Fertilisation et travail du sol	20
Gestion des rémanents	20
<i>Des forêts rhônalpines diverses et multifonctionnelles</i>	<i>22</i>
Partie 3. Des filières de production optimisées	23
Les produits bois en France métropolitaine	23
Les multiples vies d'un produit bois	25
Les effets de la substitution par l'usage du bois	27
<i>Le bois comme matériau</i>	<i>27</i>
<i>Le bois comme énergie</i>	<i>28</i>
Hiérarchie des usages du bois et additionnalité réelle des réductions des émissions	30
<i>Des sylvicultures rhônalpines tournées vers le bois d'œuvre</i>	<i>31</i>
Recommandations pour une gestion durable	32
Concilier le stockage de carbone et les autres enjeux des forêts	32
Conserver une trame de vieux bois en libre évolution, une chance pour la France	32
Faire les bons choix sylvicoles	33
Fonder sur les forêts une économie durable à faible empreinte carbone	35
Bibliographie	36
<i>Annexe : Petit exercice de prospective. Modélisation de 5 scénarii sylvicoles</i>	<i>41</i>

Introduction

La forêt est un écosystème permettant à la fois de produire de nombreuses ressources et services écologiques pour les sociétés humaines, et à une riche biodiversité de s'épanouir. L'Homme en tire des revenus (vente de bois, location de chasse, etc.), des services nombreux (gestion de l'eau, lutte contre l'érosion des sols, usages récréatifs, etc.). L'objet de ce rapport est d'étudier un service écosystémique, le stockage du carbone, particulièrement discuté dans le contexte mondial actuel (notamment en vue de la Conférence des parties de la Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques de 2015 -COP21-).

7 milliards d'humains peuplent la planète Terre, tous, à plus ou moins grande échelle, émetteurs de gaz à effet de serre (GES), parmi lesquels le dioxyde de carbone (CO₂). Ces gaz ont un effet direct sur le réchauffement climatique et les dérèglements en cours. Depuis la signature du protocole de Kyoto en décembre 1997, la communauté internationale tente de réduire les émissions de GES afin de limiter l'ampleur de ces changements climatiques. Les écosystèmes forestiers ont été identifiés à la fois comme une des sources du problème (déforestation), et un des leviers d'actions. Les forêts constituent, avec les océans, les principaux stocks de carbone dans la nature. Alors que les émissions annuelles mondiales de GES atteignaient 49 GtCO₂ (soit 13 GtC) en 2004, les océans stockaient en moyenne 8 GtCO₂, et les écosystèmes forestiers 9,6 GtCO₂ (MEDDE, 2013). À leur échelle, les écosystèmes forestiers français, qui couvrent 16 millions d'hectares en métropole, participent au stockage du CO₂ atmosphérique. La France ayant signé le protocole de Kyoto, elle cherche à la fois à réduire ses émissions de GES et à rendre son stockage de carbone plus efficace.

Le présent rapport, basé sur des études conduites en France métropolitaine, et plus largement en zone tempérée, propose des recommandations pour une gestion forestière efficiente en termes de stockage du carbone, tout en considérant les aspects économiques, écologiques et sociaux cruciaux.

Sera brièvement présentée dans une première partie la place fondamentale du cycle du carbone dans l'écosystème forestier : où se trouve le carbone forestier ? Quels sont les flux de carbone au sein de l'écosystème ? La forêt est-elle un puits ou une source de carbone ?

Une seconde partie s'attachera à discuter des impacts sur le cycle du carbone des alternatives sylvicoles les plus fréquentes.

La troisième partie sera consacrée aux rôles clé des choix dans les filières bois : que devient le carbone des produits bois exportés de l'écosystème forestier ? A quelle échelle de temps le carbone est-il stocké puis relargué dans l'atmosphère ? Quels sont les effets de la substitution d'autres matériaux par le bois ? Quelle place le bois peut-il tenir comme source d'énergie ? Nous développerons la nécessaire prise en compte d'une hiérarchie des usages pour les produits bois, ainsi que l'intérêt d'une circularité accrue dans les filières forêts-bois-papier-énergie.

En conclusion, nous nous interrogerons sur l'intérêt d'une évolution de la politique forestière française, visant à promouvoir une gestion forestière prenant en compte de manière équilibrée les enjeux du carbone, mais aussi économiques, sociaux et écologiques. Une gestion centrée sur la production de bois d'œuvre pourrait-elle répondre à ces besoins multiples ? Quel est l'intérêt de conserver une trame de vieux bois en libre évolution ?

Afin de faciliter les comparaisons des différentes variables de ce rapport, les valeurs seront autant que possible exprimées en tonne de carbone (tC).

Partie 1. Comprendre le carbone en forêt

Des données françaises résultant d'une histoire forestière ancienne

La forêt française est issue d'une longue histoire. Depuis toujours, elle a fourni aux sociétés des biens et services. Exploitée, la forêt était aussi défrichée, pour cultiver ses sols. En France, le minimum forestier date des années 1750, le taux de boisement était alors de 13 % (contre 28 % actuellement). Aujourd'hui, beaucoup de forêts françaises métropolitaines sont le fait de la recolonisation naturelle (suite à la déprise agricole) ou de plantations ; seuls 29 % des forêts actuelles sont des noyaux forestiers anciens (Vallauri & al., 2012). Un exemple est fourni figure 6 pour la région rhônalpine.

La trace de cette histoire reste inscrite dans la végétation comme dans les sols forestiers (Dupouey & al., 2002 ; Dambrine & al., 2007). Les forêts dites *anciennes*, sont des forêts qui ont toujours été boisées, et dont le sol n'a jamais été perturbé (notamment par un labour). Les sols de forêts anciennes présentent des caractéristiques différentes des sols ayant fait l'objet d'une exploitation agricole. Ils sont plus riches en carbone que les sols de forêts récentes ou des sols agricoles, à station équivalente.

La maturité est un autre critère de naturalité des forêts. Seuls 2 % de la surface forestière française présentent des forêts particulièrement âgées (DGPAAT/IFN, 2010). Une forêt *ancienne* peut être *jeune* (surface toujours boisée mais régulièrement exploitée tels les taillis méditerranéens), une forêt *récente* est plus rarement *âgée* (cas particulier de forêts ayant recolonisé des sols très fertiles et jamais exploitées depuis). Un peuplement est considéré comme mature lorsque l'essence qui le domine atteint la moitié de sa longévité, et âgé quand elle dépasse les $\frac{3}{4}$ (Rossi et Vallauri, 2013).

Les forêts âgées présentent des stocks de bois importants, que ce soit en termes de volume sur pied (forte proportion de gros arbres) ou en termes de volume de bois mort. Nous verrons que ces 2 compartiments jouent un rôle clé dans le cycle du carbone en forêt. Les données qui vont être présentées sont pour la plupart issues de l'étude de peuplements souvent récents (71 % de la forêt française) et peu matures. Il ne faut donc pas perdre de vue que les quantités de carbone qui peuvent être stockées par des écosystèmes forestiers naturels sont potentiellement bien plus importantes, et tout particulièrement dans les sols.

Les stocks de carbone de l'écosystème forestier

Les différentes références bibliographiques font état du carbone des compartiments « épigé » ou « hypogé » de l'écosystème, ou parlent du sol vs la végétation. Ces distinctions ne correspondent pas bien à la réalité des choses : par exemple, on ne sait pas où placer les arbres morts sur pied, et la nécromasse en général. L'antagonisme « mort/vivant » n'est pas non plus judicieux car ces deux compartiments sont le siège d'une activité biologique importante. Aborder la question en termes de fonctionnement et de dynamique de la forêt semble plus éclairant :

- le compartiment autotrophe utilise l'énergie solaire et capte le CO₂ atmosphérique à l'écosystème. Le stockage dans ce compartiment est important (mais il fait l'objet de prélèvements).
- le compartiment hétérotrophe utilise la matière organique morte, la nécromasse, comme source d'énergie. Il dégage du CO₂ du fait de la respiration des organismes qui la dégradent. Cependant une partie de cette nécromasse est immobilisée dans les horizons humifères, stockant ainsi le carbone à plus long terme. Au niveau de la dynamique forestière, le compartiment hétérotrophe domine en phases vieilles et terminales (André, 1997).

Au sein de ces compartiments, certains éléments ont un rôle de stockage du carbone (sol, tronc, branches, grosses racines, humus), alors que d'autres interviennent plus spécialement dans les processus de transformation des formes du carbone (litière : feuilles, brindilles ; racines fines).

Toutefois, ce ne sont pas les compartiments autotrophe/hétérotrophe qui sont utilisés dans la majorité des études analysées. Nous avons donc fait le choix, pour faciliter les comparaisons, de conserver la distinction habituelle épigé/hypogé.

Plus de la moitié du stock de carbone d'un écosystème forestier est compris dans le sol (49 %) et la biomasse souterraine (11 %), et seulement 41 % dans la biomasse aérienne (tableau 1). Les chiffres du tableau 1 sont issus de moyennes à l'échelle nationale ou européenne : ces pourcentages peuvent varier en fonction des types de peuplements pris en compte, de leur âge, des conditions de station, etc.

Attention comme rappelé dans le paragraphe précédent, la nécromasse dont il est ici question concerne des volumes courants en forêt gérée (au plus 20 m³/ha, le plus souvent moins de 5 m³/ha), il est nettement supérieur en forêt naturelle (au moins 50 m³/ha, pouvant atteindre plus de 200 m³/ha). A titre d'exemple, en Suisse le volume moyen de bois mort à l'hectare est de 18 m³/ha (soit 7 tC/ha) contre 6,5 en France (2,5 tC/ha).

Les compartiments « *Litière* » et « *Bois mort au sol* » seraient à rattacher au compartiment « *Sol* » : le carbone de ces 2 compartiments est dégradé par les microorganismes du sol, le produit de cette dégradation étant en partie immobilisée sous forme de produits humifiés.

Tableau 1. Répartition du carbone dans l'écosystème forestier

	Dupouey & al., 2000		Buchholz & al., 2014		Luyssaert & al., 2008		Taverna & al., 2007		Lecocq & al., 2008	IFN, 2010
Biomasse aérienne	42 %		37 %		46 %		47 %		42 %	36 %
	<i>Bois fort, branches</i>	32 %	<i>Tronc, écorce</i>	23 %	<i>Biomasse aérienne</i>	17 %	<i>Tronc</i>	41 %		
	<i>Feuilles</i>	2 %	<i>Feuille, branches</i>	10 %	<i>Litière, bois mort au sol*</i>	29 %	<i>Bois mort debout</i>	4 %		
	<i>Sous-étage, nécromasse</i>	2 %	<i>Bois mort debout</i>	2 %			<i>Litière, bois mort au sol*</i>	1 %		
	<i>Litière*</i>	6 %	<i>Litière, bois mort au sol*</i>	2 %						
Biomasse souterraine	7 %		9 %				12 %		15 %	10 %
	<i>Racines</i>	7 %	<i>Racines</i>	9 %						
			<i>Racines mortes</i>	1 %						
Sol	51 %		54 %		54 %		42 %		43 %	54 %
	<i>0-10 cm</i>	26 %	<i>Horizons organiques</i>	10 %	<i>Horizons organiques, racines</i>	54 %				
	<i>10-20 cm</i>	16 %	<i>0-20 cm</i>	20 %						
	<i>20-30 cm</i>	9 %	<i>> 20 cm</i>	24 %						

Le stock de carbone souterrain

Si l'on considère le compartiment « Sol » dans son intégralité (biomasse souterraine, bois mort au sol, litière complexes organo-minéraux), 65 % du carbone y est stocké contre 35 % dans la biomasse aérienne (tableau 1). Ces valeurs, acquises indépendamment, sont pratiquement identiques (64 / 36 +/- 4 %) dans le rapport du Collectif APN (2015), en ne tenant compte que des 30 premiers centimètres du sol.

Biomasse racinaire

On évalue à environ 11 % du carbone total la part stockée dans la biomasse racinaire. Ce chiffre reste une moyenne, ne tenant pas compte ni des différences d'âges ni des différents types de chevelus racinaires. La biomasse racinaire varie en effet en fonction de l'âge des arbres : elle augmente au cours des 5 à 10 premières années, puis diminue brutalement et se stabilise une fois l'arbre mature (Drénou, 2006). Ainsi, elle représente environ 23 % du carbone stocké dans la biomasse aérienne pour des arbres jeunes (8 ans) et 11 % pour des arbres plus âgés (145 ans) (Huet & *al.*, 2004, *in* Drénou, 2006).

Cette biomasse est composée des racines vivantes et mortes. La biomasse souterraine est aujourd'hui estimée à l'aide d'un coefficient unique, le facteur d'expansion des racines (FER, rapport de la masse ligneuse totale à la masse ligneuse aérienne). Celui-ci est estimé à 1,29 soit 23 % de la masse totale de l'arbre (Dupouey et Pignard, 2000).

La présence d'une rhizosphère (zone directement influencée par les exsudats racinaires, environ 1 mm autour des racines fines) est un facteur essentiel pour la dégradation et la stabilisation du carbone. En effet, la rhizosphère est un compartiment du sol biologiquement très actif (en moyenne 20 fois plus de micro-organismes que dans le reste du sol). Elle joue un rôle important dans la formation, le maintien et le turn-over de la matière organique dans les sols.

Matière organique du sol

La matière organique des sols forestiers provient de deux sources principales (figure 3) :

- la transformation des résidus végétaux (feuilles, branches, racines, bois) en particules organiques de tailles variables, et en moindre quantité du lessivage des houppiers (molécules très labiles, composés types phénols, glucides simples, dépôts atmosphériques ; Kuiters, 1987). Ces particules s'accumulent en majeure partie en surface (0-40 cm, horizons organiques et organo-minéraux) et plus faiblement dans les horizons minéraux (voir ci-dessus).

- les exsudats racinaires des racines fines de la rhizosphère ainsi que la biomasse des racines fines mortes.

La biodégradation des litières joue un rôle central dans le recyclage des nutriments. En fonction des teneurs relatives en constituants majeurs (cellulose, lignine et hémicellulose) la biodégradation sera plus ou moins efficace et les microorganismes impliqués plus ou moins spécialisés (Moukoui & *al.*, 2006). L'évolution des matières organiques est conditionnée par leur nature biochimique (teneur en azote, en lignine, en polyphénols). Elles sont composées de molécules ayant des temps de résidence allant de la dizaine d'années au millénaire. Ainsi, la cellulose est dégradée rapidement, alors que les lignines, vont libérer des formes plus stables (polycondensats de tannins-protéines, formes phénoliques polycycliques telles les acides fulviques, humiques ou les humines figure 1).

La vitesse de décomposition de la matière organique varie en fonction de la structure du sol, de la taille et de l'arrangement des particules organiques (Garnier & *al.*, 2006). Une forte teneur en argile permet par exemple d'adsorber une plus grande quantité de carbone. Les agrégats constituent quant à eux une protection physique contre la décomposition de la matière organique. La vitesse de décomposition dépend aussi des conditions de température et d'humidité, de la teneur en oxygène du sol et des perturbations qui peuvent lui être causées.

Les horizons profonds présentent une forte capacité de stockage des matières organiques (figure 3), et constituent un réservoir qui cumule entre 1/3 (Liski & *al.*, 2002) et 2/3 du carbone total du sol (selon les types de sol et la profondeur considérée). Toutefois, en raison des difficultés d'analyses sur de grandes profondeurs, ce réservoir n'est souvent pas considéré. Par ailleurs, ce sont principalement les horizons supérieurs qui évoluent sur le court et le moyen terme, en fonction des évolutions du climat ou des pratiques sylvicoles : ils sont donc les plus étudiés.

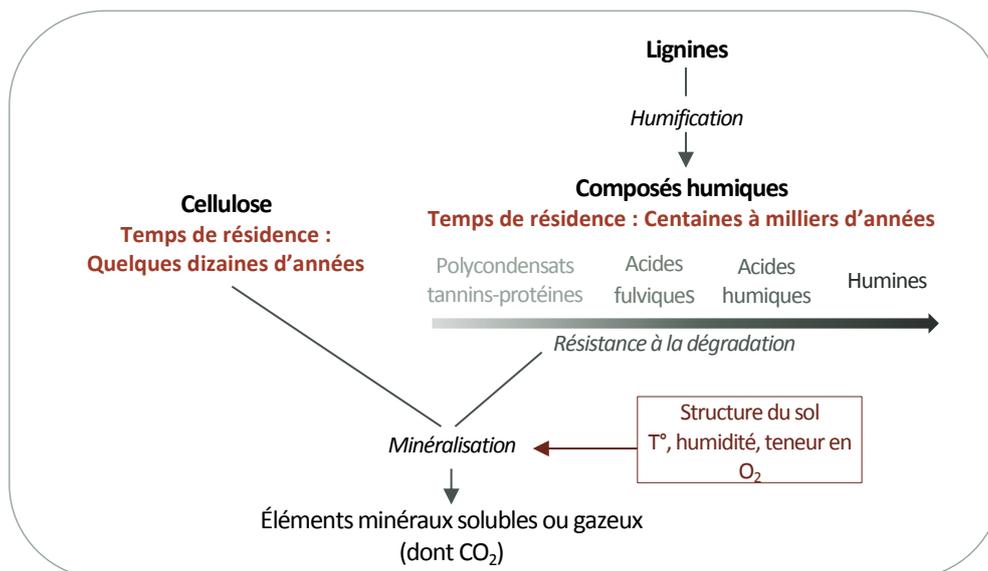


Figure 1. Évolution de la matière organique du sol

Les humus ont un rôle particulièrement actif dans le recyclage du carbone. Les mull actifs présentent les taux de carbone les plus faibles alors que les mor et moder présentent des taux de carbone qui dépassent les 30 t/ha (Benbrahim & *al.*, 2006 ; figure 2). Ceci s'explique par 2 raisons :

- Les moder (conifères) et les mor (Ericacées) accumulent le carbone dans les horizons supérieurs, tandis que les mull l'accumulent tout le long du profil (les mesures s'arrêtent souvent à 40 cm de profondeur) ;
- Les mull présentent une forte activité des vers de terre) qui contribuent à une minéralisation plus rapide de la matière organique (Lavelle et Spain, 2001).

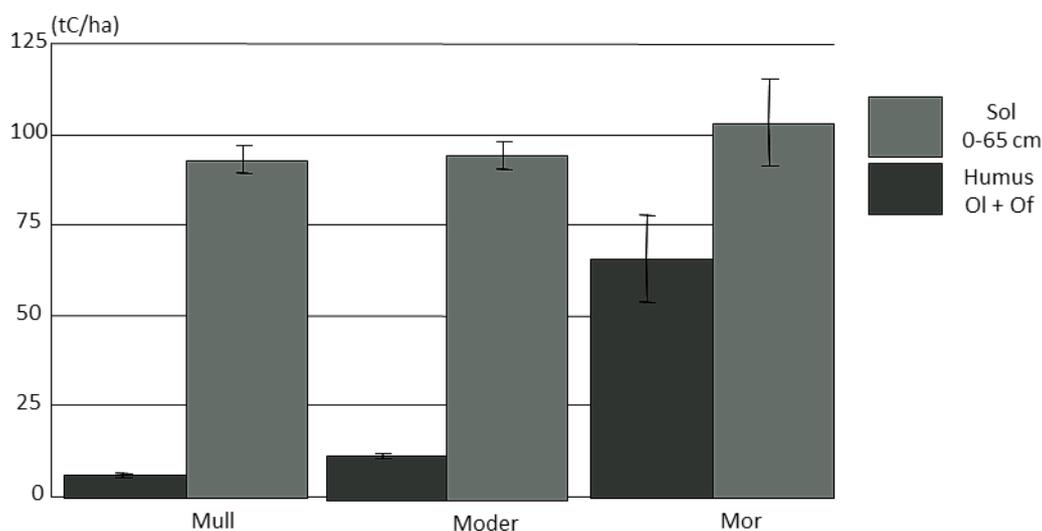


Figure 2. Répartition du carbone pour les 3 types d'humus (Nys & al., 2002)

Au-delà des types d'humus, on constate que les vieux humus sont plus riches en carbone. Les acides fulviques constituent une des fractions les plus importantes des humus jeunes. Ces acides évoluent ensuite vers des acides humiques puis des humines (figure 1). Leurs structures chimiques sont analogues, mais les humines possèdent un nucléus polyphénolique récalcitrant plus important, ce qui fait que la résistance à la dégradation de ces composés humiques augmente. La matière est mieux stockée et plus persistante (Toutain, 1981 ; Duchaufour, 1977 ; Swift & *al.*, 1978 ; Andreux, 1996). Toutefois des molécules réputées labiles, comme les sucres simples, peuvent persister très longtemps dans les horizons édaphiques (Dambrine, com. pers.) sans doute protégées par adsorption sur des argiles ou au sein d'agrégats (Dommergues et Mangenot, 1970).

En résumé, on distingue 4 formes différentes de carbone du sol (Gershenson & *al.*, 2011, figure 3) :

- carbone à courte durée de vie (< 1 an), représenté par la biomasse des micro-organismes et les exsudats racinaires labiles, facilement décomposables,
- carbone de la litière (environ 1 an pour les mull, 3 à 5 ans pour les mor et moder) comprenant la matière organique,
- carbone à moyenne durée de vie (quelques années à quelques décennies), représenté par des molécules plus complexes (sucres),
- carbone à longue durée de vie (centaines à milliers d'années), représenté par les acides fulviques, humiques, et les humines.

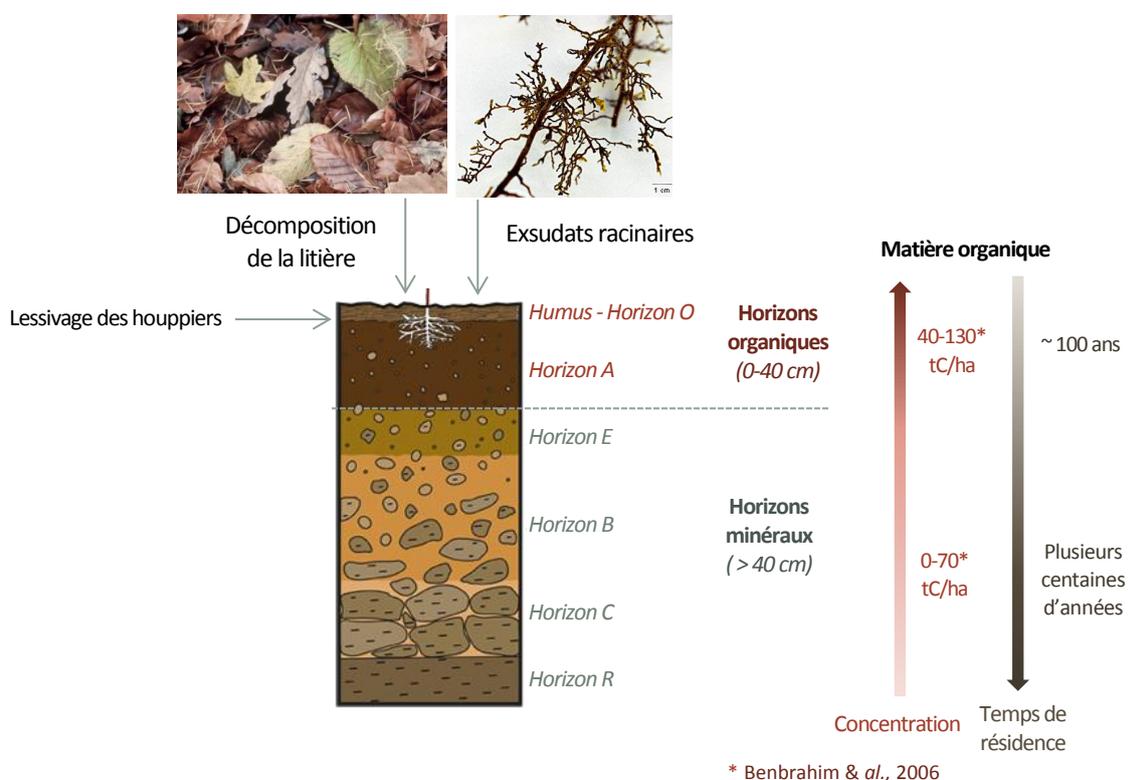


Figure 3. Concentration en carbone et temps de résidence de la matière organique dans un sol forestier

En forêt française, le carbone contenu dans le sol représente en moyenne 79 tC/ha (Dupouey et Pignard, 2000), (1 074 MtC pour l'ensemble de la forêt française). Les Suisses obtiennent une valeur légèrement supérieure de 111 tC/ha (Taverna & *al.*, 2007). Cette moyenne ne donne qu'un ordre d'idée et ne peut servir à qualifier la forêt française, les différences entre peuplements étant importantes. L'influence de la station, du climat, de l'histoire (ancienneté de l'état boisé) ou de la gestion sur la valeur de ce stock seront discutés plus loin.

Le carbone du sol reste toujours sous-estimé car la quantité de carbone du sol est mesuré dans la plupart des études jusqu'à 30 à 40 cm de profondeur au maximum. Or, les horizons profonds contiennent également une quantité non négligeable de carbone, de l'ordre d'au moins 1/3 du stock total de carbone du sol d'après Liski & *al.* (2002).

Le stock de carbone dans la biomasse

La biomasse aérienne (bois fort, écorce, branches) contient entre 35 et 41 % de l'ensemble du carbone forestier (selon que l'on considère la nécromasse comme rattachée ou non à ce compartiment).

Le calcul de la quantité de carbone prend en compte le volume de bois, sa densité, le taux de carbone moyen et le facteur d'expansion branches (FEB, qui est le rapport de la masse ou du volume ligneux aérien total à la masse ou au volume des tiges).

Les volumes de bois fort sont pour la France fournis par les inventaires de l'IGN (ou localement des inventaires plus précis). Les données actuellement disponibles ne permettent pas de décliner les facteurs d'expansion que ce soit des branches ou des racines par essence (pour les branches, on arrive à avoir des estimations pour les groupes feuillus/résineux, pour les racines, les résultats ne concordent pas). Les densités sont quant à elles disponibles par essence, mais elles varient considérablement en fonction de l'âge de l'arbre (20 % de la variance, d'après Bergès, 1999), et sans doute selon les compartiments considérés (branche, tronc, aubier, duramen, écorce, racines).

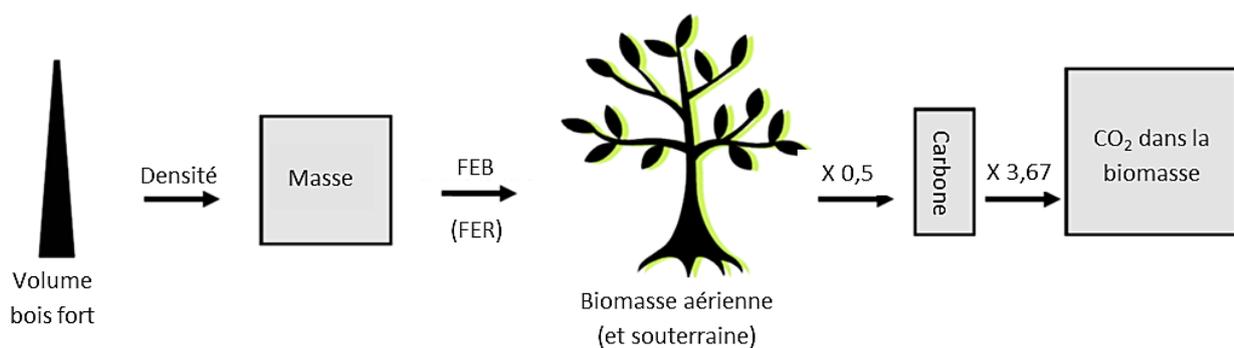


Figure 4. Calcul de la quantité de carbone dans la biomasse

Le taux de carbone dans la biomasse est sujet à des difficultés d'estimation (de 45 à 55 %), le taux de 50 % a été conservé car c'est le plus couramment utilisé (notamment par Dupouey & *al.*, 2000). On peut ensuite ramener la quantité de carbone en quantité de CO₂ (voir figure 4 et tableau 2). En résumé :

Pour la biomasse aérienne uniquement : $C = V_{\text{bois fort}} \times \text{Densité} \times \text{FEB} \times 0,5$

Pour la biomasse aérienne et souterraine : $C = V_{\text{bois fort}} \times \text{Densité} \times \text{FEB} \times \text{FER} \times 0,5$

Tableau 2. Quelques estimations de la quantité de carbone mesurée en forêt, contenue dans 1 m³ de bois (feuillu et résineux)

	IFN, 2010		Loustau, 2004		Taverna & <i>al.</i> , 2007		Dupouey & <i>al.</i> , 2000	
	Feuillus	Résineux	Feuillus	Résineux	Feuillus	Résineux	Feuillus	Résineux
Densité	0,528	0,395	0,546	0,438	0,556	0,385		
FEB*	1,4	1,3	1,611	1,335	1,580	1,580		
Densité x FEB	0,739	0,514	0,880	0,585	0,878	0,608	0,672	0,450
FER**	1,143	1,154	1,28	1,30	1,00	1,00	1,28	1,29
Taux de carbone	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
1 m ³ de bois contient... tC	0,42	0,30	0,56	0,38	0,44	0,30	0,43	0,29

* FEB : Facteur d'expansion branche ** FER : Facteur d'expansion racine

Attention ces coefficients sont valables pour la biomasse des arbres, pour le sol le coefficient de conversion est différent. On peut convertir la proportion de matière organique du sol en proportion de carbone avec un coefficient de conversion de 1,72 (NF ISO 14235) : taux de carbone du sol = taux de matière organique/1,72.

En moyenne pour la forêt française, la quantité de carbone contenue dans la biomasse aérienne et souterraine est de 59 tC/ha (Dupouey & al., 2000) soit 1 137 MtC pour l'ensemble de la forêt française (IFN, 2010). Le rapport Carbofor donne une moyenne de 71 tC/ha (76 tC/ha pour les feuillus, 62 tC/ha pour les résineux) (Loustau, 2004).

À titre de comparaison (tableau 3), la valeur moyenne est de 135 tC/ha en Slovénie, 121 tC/ha en Suisse, et 116 tC/ha en Allemagne (Brändli, 2010). Ces moyennes donnent un ordre d'idée moyen national et ne peuvent servir à qualifier une forêt donnée, les différences entre peuplements étant importantes. Elles sont directement dépendantes des choix sylvicoles dominants dans le pays. Ainsi, à contextes biogéographiques proches, les forêts des Alpes suisses et slovènes, traitées en futaie irrégulière et continue en majorité, présentent un stock de carbone supérieur à celles de Rhône-Alpes (voir figure 7). Les forêts françaises, dont la majorité sont jeunes, récentes et peu capitalisées, compte en moyenne seulement 75 tC/ha.

Tableau 3. Comparaison des stocks de carbone pour quelques pays européens (d'après Brändli, 2010)

Les données du tableau ne concernent que la biomasse aérienne et souterraine et ne prennent pas en compte le carbone du sol.

	Stock C (MtC)	Surface boisée (milliers ha)	Stock C (tC/ha)	Volume sur pied (m ³ /ha)
Slovénie	171	1 265	135	283
Suisse	147	1 216	121	347
République tchèque	317	2 650	120	278
Allemagne	1 283	11 091	116	305
Slovaquie	219	1 934	113	256
Autriche	376	3 859	97	300
France	1 166	15 568	75	158
Italie	716	9 970	72	145

Les flux de carbone en forêt

Au sein des écosystèmes forestiers, le cycle du carbone est éminemment dynamique. Il est composé de deux flux de principaux : l'assimilation du CO₂ par les arbres *via* la photosynthèse, et le relargage *via* la décomposition de la litière et du bois mort. Les activités humaines interviennent sur ces flux, notamment en diminuant le stock de bois sur pied (en surface par défrichage, en volume par les coupes). Nous discuterons en partie 2 de la relation entre cette diminution de stock et l'augmentation de l'accroissement courant après une coupe des arbres laissés sur pied, ainsi que du potentiel stockage de carbone dans les produits ligneux exportés en partie 3.

En ce qui concerne le sol, on sait bien évaluer la quantité des retombées de litière, ainsi que la quantité de CO₂ produite par la respiration du sol. On connaît mal en revanche la part des racines dans la respiration totale. Le carbone s'accumule dans les sols forestiers du fait de l'évolution de la matière organique (bois mort au sol, litière aérienne et biomasse racinaire). Une partie est relarguée par les processus de respiration des racines, de la faune, de la fonge et des bactéries du sol. Une autre partie du carbone du sol est lessivé sous forme de carbone organique dissous vers les nappes phréatiques, les rivières, les lacs ou les océans (à raison d'environ 0,1 tC/ha/an).

Concernant la production de la biomasse aérienne, plusieurs variables font l'objet d'évaluation (tableau 4) :

- L'accroissement en biomasse (Δ biomasse, quantité de carbone stockée)
- La production primaire nette (NPP, quantité de carbone utilisée pour accroître la biomasse)
- La production nette de l'écosystème (NEP, prenant en compte la NPP et la respiration hétérotrophe Rh).

La NEP inclue de fait le volume de bois récolté. En résumé, Lecoq & al. (2008) proposent la formulation suivante :

$$\text{NEP} = \text{NPP} - \text{Rh} = \Delta\text{biomasse} + \text{chutes de litière} + \text{turn-over racinaire}$$

Tableau 4. Quelques valeurs de production primaire nette et de production nette

Valeurs moyennes pour...	La zone tempérée Lecoq & al., 2008	La forêt européenne Luyssaert & al., 2010	L'ensemble de la forêt française	
			Loustau, 2004	Liksi & al., 2002
NEP	2,85 tC/ha/an	0,75 tC/ha/an	1,05 tC/ha/an	0,55 tC/ha/an
NPP	6,23 tC/ha/an	5,2 tC/ha/an		

À l'échelle de la forêt française, la production biologique moyenne ($\Delta\text{biomasse}$) est de 86,7 Mm³/an (51,9 Mm³/an feuillus, 34,5 Mm³/an résineux), soit 32 MtC (dont 20 MtC sont prélevés chaque année, voir la partie 3).

Ces flux sont à mettre en regard des émissions de carbone fossile (figure 5). Les émissions françaises de CO₂ étaient en 2010 de 347 MtCO₂ (490 MtCO₂ si l'on considère l'ensemble des gaz à effet de serre, MEDDE, 2013), soit 94,5 MtC (133,5 MtC pour l'ensemble des GES).

Le flux net de carbone généré par la forêt (stockage dans l'écosystème forestier et les produits bois, voir partie 3) représente donc 34 % de l'ensemble des émissions annuelles de CO₂ françaises (et 24 % des émissions totales de GES).

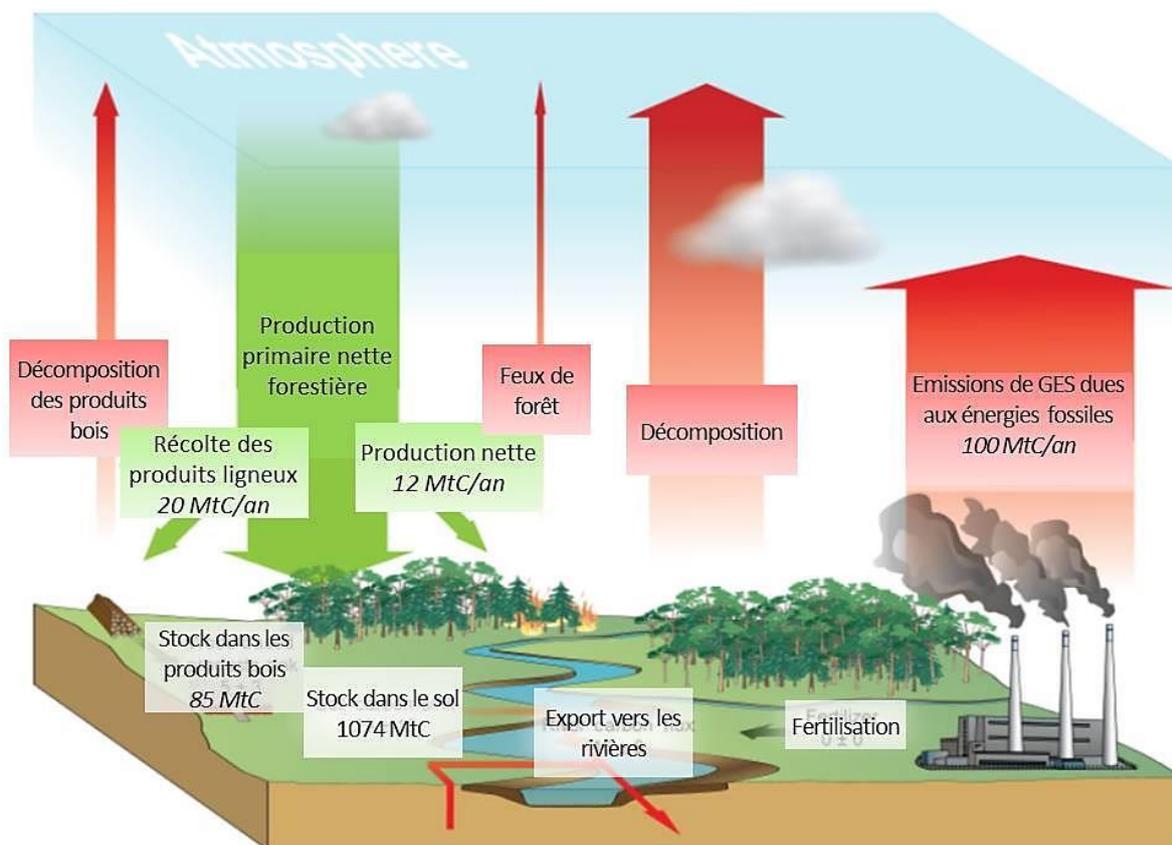


Figure 5. Les flux de carbone forestier pour la France en regard des émissions de GES dues aux énergies fossiles (d'après Luyssaert & al., 2010)

En conclusion, les stocks de carbone des écosystèmes forestiers métropolitains sont considérables (2211 MtC en 2000). Le compartiment *Sol* renferme plus de la moitié du carbone total. L'autre moitié est contenue dans la biomasse aérienne, influencée par la sylviculture pratiquée et les récoltes. Il est donc crucial à la fois :

- de ne pas perturber le fonctionnement des sols si l'on souhaite assurer la pérennité des stocks de carbone en forêt;
- de gérer les peuplements forestiers de façon à conserver (ou restaurer) un stock de carbone optimal.

Les changements climatiques modifient-ils le cycle naturel du carbone ?

Nous rappelons que cette partie ne concerne que les écosystèmes forestiers français métropolitains. Les changements climatiques induisent à la fois l'augmentation de la teneur en CO₂ dans l'atmosphère, la hausse des températures (entre 1,6° et 4,5° d'ici à 2100 selon les prévisions du GIECC) et la réduction des précipitations. En synergie, les dépôts azotés jouent également un rôle capital souvent négligé (Ferry & *al.*, sous presse). Ces modifications ont des effets sur la biomasse aérienne et le sol.

Au niveau de la biomasse aérienne, l'augmentation de la teneur en CO₂ stimule la photosynthèse et améliore l'efficacité en eau (les stomates s'ouvrent moins pour assimiler une même quantité de carbone). La hausse des températures allonge la durée de végétation, améliore la minéralisation de l'azote du sol, mais amplifie le stress hydrique en période sèche. Les dépôts azotés accroissent en particulier le développement du feuillage et donc la production de litière. La conjonction de tous ces facteurs a conduit à une hausse de la productivité des forêts françaises, évaluée à 50 % au cours du 20^{ème} siècle (Ferry & *al.*, sous presse).

Au niveau du sol, l'augmentation de la teneur en CO₂ stimule le développement des racines fines et la production d'exsudats racinaires. Ce phénomène, combiné à la hausse des températures, entraîne une activation des microorganismes du sol, et une augmentation de la respiration (donc des émissions de CO₂). L'augmentation des apports de matière organique au sol résultant de la productivité accrue de la biomasse aérienne est donc compensée par la minéralisation du carbone du sol plus rapide, particulièrement celle des matières organiques stables. Cette minéralisation peut être limitée par une disponibilité en eau insuffisante. Les dépôts azotés auraient un effet positif sur le stockage de carbone par le sol. Ils limiteraient la minéralisation du carbone du sol en modifiant la communauté microbienne. Les décomposeurs de matière organique riches en carbone et faciles à dégrader (cellulose) sont favorisés, au détriment des microorganismes spécialisés dans la dégradation des molécules récalcitrantes (composés humiques)(Ferry & *al.*, sous presse).

En conclusion, à moyen terme (2050), la hausse des températures et de la teneur en CO₂ dans l'atmosphère auraient plutôt tendance à augmenter le stock de carbone dans la biomasse aérienne et à diminuer celui du sol. Toutefois, les dépôts azotés pourraient limiter cette réduction. Leur rôle de fertilisant au niveau de la biomasse aérienne serait limité à l'avenir par une moindre disponibilité en phosphore (Ferry & *al.*, sous presse). À plus long terme, selon le scénario de changement climatique retenu, des dépérissements ou pertes de fertilité importants pourraient apparaître, notamment dans certains bioclimats sensibles (exemple de l'écorégion méditerranéenne). Cependant, discuter du bilan et des stocks de carbone pour cette période dépasse le périmètre de ce rapport.

À une échelle plus limitée, les coupes de bois et la fertilisation azotée induisent des effets similaires aux changements climatiques, ils seront détaillés dans la partie suivante.

Rhône-Alpes en exemple

Vers une restauration du carbone dans les forêts rhônalpines

Rhône-Alpes est la deuxième région forestière de France par sa superficie et la première par son volume de bois sur pied. 38 % du territoire régional (1,7 millions d'ha) est boisé. 8 % des forêts actuelles sont des noyaux forestiers anciens (hors Savoie, non incluses dans le royaume de France à l'époque de Cassini) (Vallauri & al., 2012, figure 6). Aussi les forêts rhônalpines sont pour la majorité récentes et jeunes, ce qui n'est pas sans conséquence sur les peuplements et le carbone.

Le volume de bois sur pied est estimé à 276 Mm³ (46 % de feuillus, 54 % de résineux). L'épicéa, le sapin et le hêtre sont les principales essences dominantes. Le volume moyen sur pied est de 186 m³/ha (soit 66 tC/ha), ce qui est plus élevé que la moyenne nationale française (157 m³/ha, soit 59 tC/ha), mais faible par rapport aux moyennes suisses ou allemandes (respectivement 121 et 116 tC/ha, tableau 3, figure 7) et au potentiel biologique.

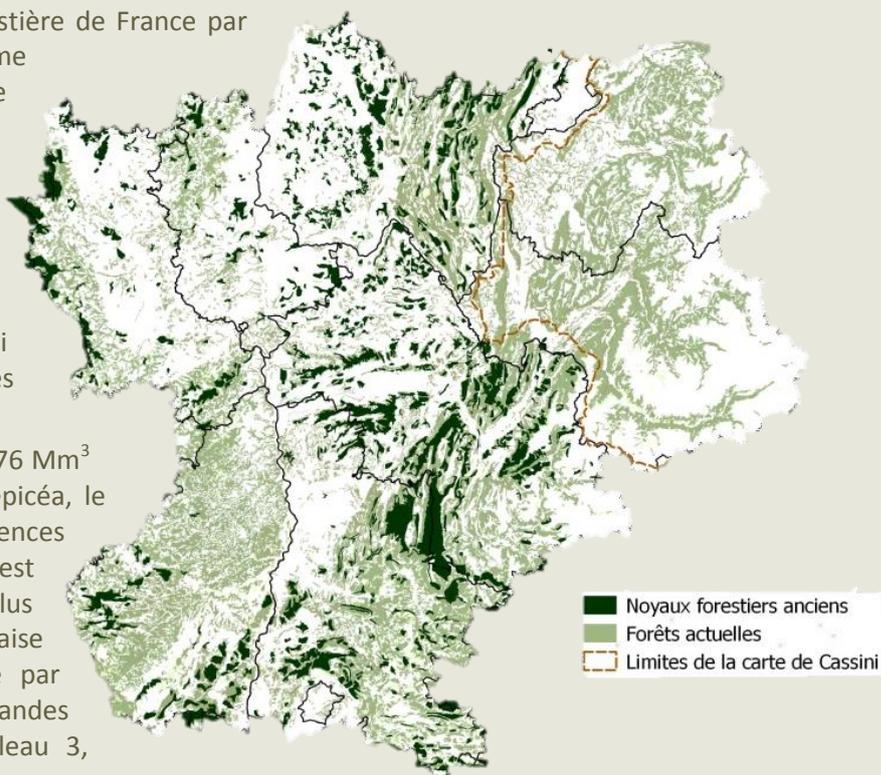


Figure 6. Carte des forêts de Rhône-Alpes distinguant noyaux forestiers anciens et forêts récentes (d'après Vallauri & al., 2012)

Le stock de carbone moyen dans les sols rhônalpins s'élève à 78 tC/ha pour les 30 premiers centimètres du sol (CITEPA, 2007), il est donc équivalent à la moyenne nationale (71 tC/ha). Le stock total des forêts de Rhône-Alpes s'élève donc à 229 MtC. Annuellement, la croissance est de 8,7 Mm³/an, captant ainsi 3,1 MtC/an (dont 1,6 MtC sont récoltés). 40,4 MtCO₂ (ensemble des GES) ont été émis en 2014 en Rhône-Alpes soit 11 MtC. La forêt rhônalpine capte l'équivalent de 28 % des émissions annuelles de GES de la région nationale (même valeur que la moyenne chaque année en forêt l'équivalent tenu du potentiel biologique, cet forêt au moins une cinquantaine de la Suisse le montre).

émissions annuelles de GES de la région nationale) ; elle stocke durablement de 12% des émissions). Compte effet puits pourra se poursuivre en d'années, comme l'exemple

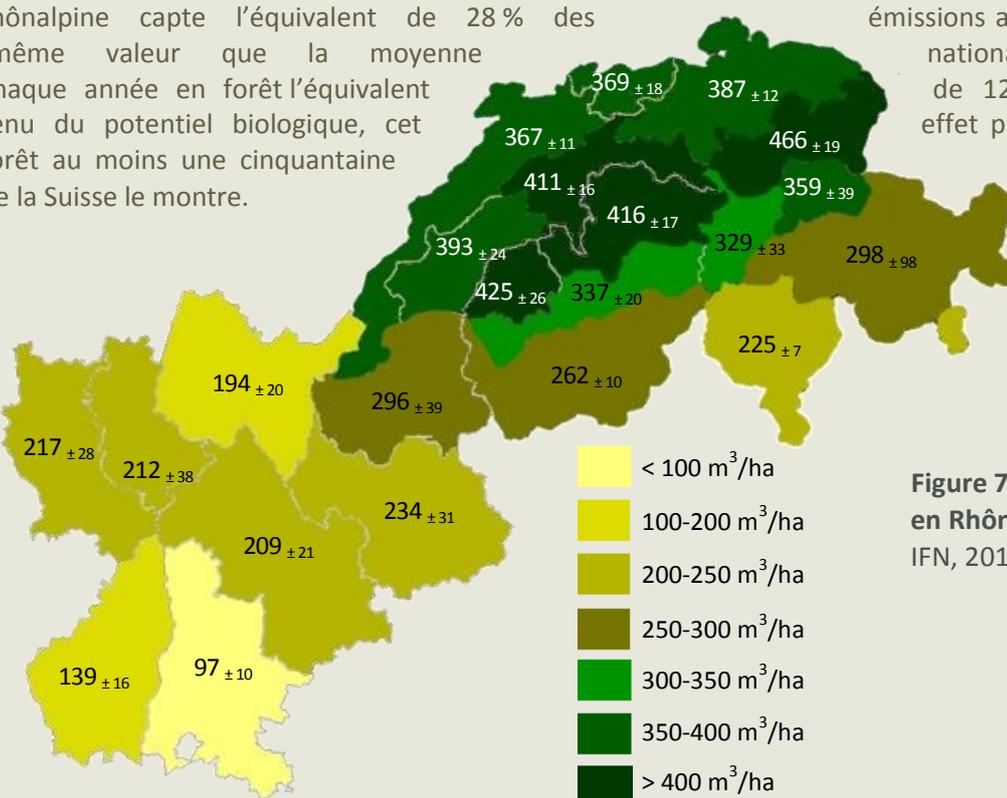


Figure 7. Volumes à l'hectare de bois en Rhône-Alpes et en Suisse (d'après IFN, 2010 ; Brändli, 2010)

Partie 2. Comment la sylviculture influence-t-elle le stockage du carbone ?

Tout au long de cette partie, un soin tout particulier sera apporté à ne pas mélanger deux notions : le stockage du carbone par l'écosystème forestier (la quantité de carbone présente dans l'écosystème à un instant donné), et la vitesse d'assimilation du carbone par l'écosystème (l'importance du flux de carbone capté sur une période donnée par l'écosystème).

Si l'on choisit d'orienter la gestion pour répondre aux enjeux carbone, il est possible de réfléchir de trois façons, non excluantes, mais qui sont souvent portées de façon confuses dans les débats. D'un point de vue mathématique, il s'agit d'aborder la question sous la forme d'une valeur (stock de carbone), de sa dérivée (accroissement annuel) ou de sa dérivée seconde (accélération de l'accroissement). On a alors 3 possibilités.

1. On cherche à optimiser le stock de carbone du capital sur pied, en fonction de la valeur de référence naturelle de la station. Cette méthode présente le plus d'atouts que ce soit d'un point de vue du stockage de carbone, qu'économique ou écologique. Dans ce cas, plus le cycle sylvicole est long, plus le stock de carbone sera important et proche des valeurs naturelles. Théoriquement on pourrait même le dépasser (« surcapitalisation » réelle, ce qui n'est jamais le cas actuellement en France), du fait du maintien sur pied des peuplements matures. C'est la façon la plus logique de réfléchir par rapport au changement climatique. Le stock cible n'est toutefois pas la référence naturelle, mais tient compte des autres usages/productions attendues, et de la hiérarchie des usages.

2. On maximise l'accroissement (la dérivée du stock de carbone), et donc la vitesse d'assimilation du carbone dans le capital sur pied. Il faut que l'âge d'exploitabilité soit égal à l'âge auquel l'accroissement moyen annuel est maximal. Cet âge varie en fonction de l'essence et de la fertilité de la station. Il est inférieur à l'âge auquel le maximum du stock est atteint (Lecoq & al. 2008). Réfléchir sur la base d'accroissement n'a de sens que dans le cas où :

- a) *La valeur du bois sur pied est constante quel que soit l'âge de l'arbre.* Cela est généralement faux, sauf pour le bois d'industrie. Pour du bois d'œuvre, 1 m³ de bois coupé à 20 ans aura moins de valeur qu'1 m³ coupé à 120 ans. C'est également vrai pour la biodiversité : les espèces associées aux forêts âgées sont plus diverses et plus rares que celles associées aux jeunes forêts ;
- b) *Dans le cadre de restauration de forêts sur terres agricoles.* La surface du boisement est une constante, le but est donc d'obtenir rapidement un volume important ;
- c) *Pour des peuplements destinés à des productions particulières* (mono-fonctionnalité, plantation artificielle type peupleraies) ;
- d) *Dans le cas de réflexion sur la compensation d'émission* également annualisée (moindre surface à compenser).

3. On maximise l'augmentation de l'accroissement (l'accélération sur une durée limitée) où l'on se déconnecte du rapport à la croissance en fixant une durée donnée (correspondant au type de produit souhaité). C'est le cas des sylvicultures dédiées par exemple à l'énergie (taillis à courtes ou très courtes rotations).

Cette réflexion est analogue à celle de la gestion financière, où l'on aurait à gérer un patrimoine en optimisant soit un capital, soit un taux d'intérêt, soit en spéculant au gré des sautes d'humeur de la Bourse. *In fine*, en forêt comme pour son épargne, seul le capital réel est une richesse.

Age et durée des cycles sylvicoles

Si l'on se replace dans la première possibilité décrite ci-dessus, où l'on cherche à optimiser le stock de carbone de l'écosystème forestier, la meilleure option est la libre évolution. Lecoq & al. (2008) observent que « *quels que soient les modes de gestion comparés et les conditions pédoclimatiques, les peuplements non gérés présentent toujours un stock de carbone dans la biomasse plus élevé que les peuplements gérés.* ». Ces résultats sont identiques à ceux de Nunery et Keeton (2010) qui constatent que « *les forêts de bois dur nord-américaines non gérées séquestrent 39 à 118 % de carbone de plus que les forêts gérées selon tous les scénarios envisagés, et cela même en prenant en compte le carbone séquestré dans les produits bois* (figure 13). » La question du stockage du carbone et des effets de la substitution par les produits bois est importante, et sera discutée dans la partie suivante.

Ces résultats sont encore attestés par des études nationales (Dupouey & al., 2000), européennes (Ciais & al., 2008 ; Seidl & al., 2008 ; Luyssaert & al., 2008), ou internationales (Luyssaert & al., 2008 ; Foster & al., 2010 ; Buchholz & al., 2014 ; Keith & al., 2014 ; Stephenson & al., 2014), qui toutes concluent que les forêts âgées non gérées stockent plus de carbone que les forêts gérées. Ceci est lié à plusieurs causes : le diamètre des arbres et le volume de biomasse sur pied, le carbone du sol, le carbone de la nécromasse.

La libre évolution des peuplements suppose des forêts à haute naturalité, le plus souvent âgées ($> \frac{1}{2}$ de la longévité de l'essence dominante, soit 150 ans pour le hêtre, le sapin ou l'épicéa, 250 ans pour les chênes). Ce sont des écosystèmes équilibrés : les essences climaciques dominant le peuplement, en mélange avec des essences pionnières et post-pionnières dans les trouées ; la structure est irrégularisée, constituant un peuplement multi-strates ; le cycle sylvigénétique peut être complet et comporter à la fois des phases de régénération composée de jeunes arbres, des phases de croissance, des phases de maturité et de sénescence où les arbres de gros diamètre dominant, et des phases d'écroulement riches en bois mort (figure 8).

L'exploitation forestière, en prélevant les arbres matures, ampute l'écosystème des phases terminales du cycle sylvigénétique (vieillissement et écroulement), ainsi que de leurs cortèges biologiques inféodés (André, 1997 ; Vallauri et al., 2005) et de leur importante nécromasse.

Or, lors de la phase de vieillissement, l'écosystème forestier a une capacité de stockage du carbone maximale, et une vitesse d'assimilation du carbone comparable à celle des forêts en croissance.

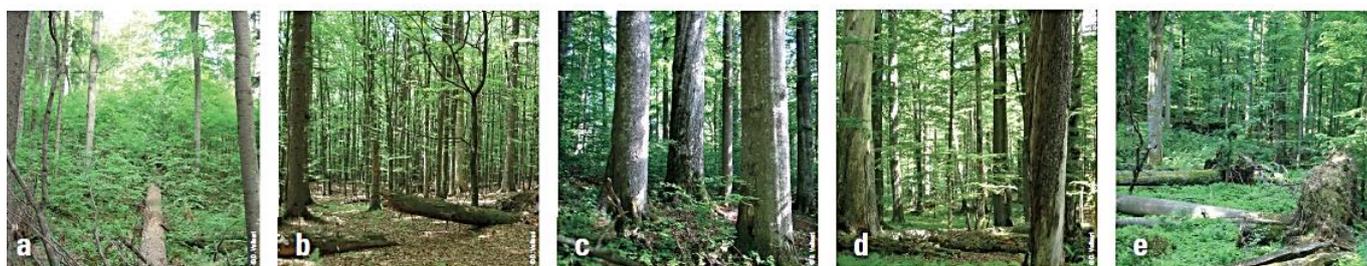
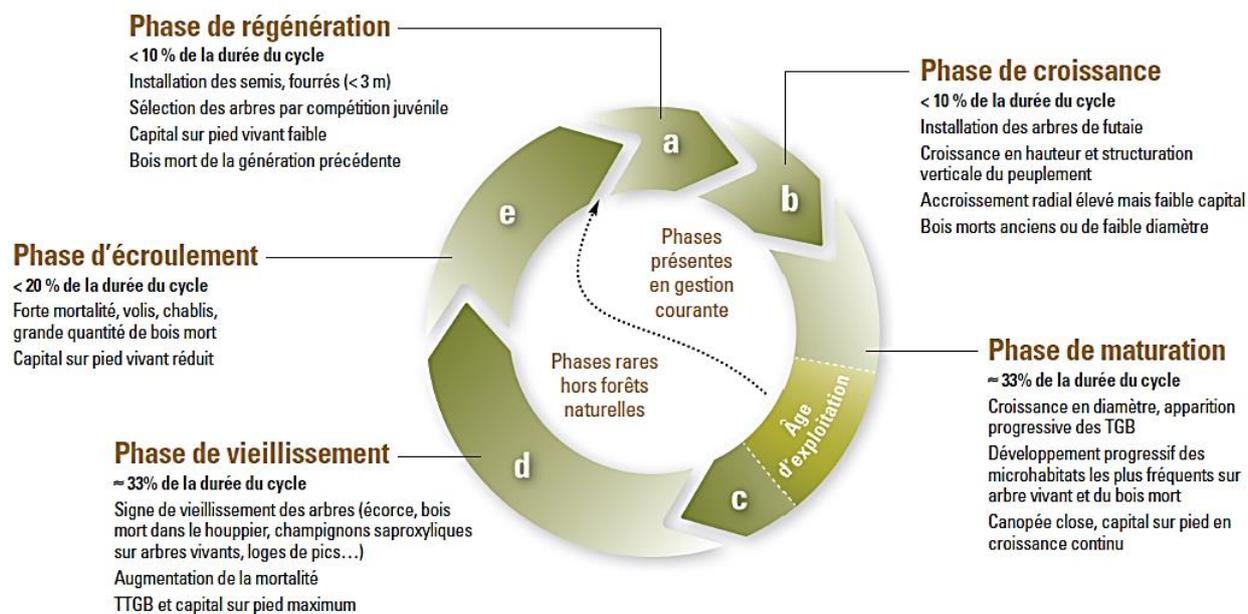


Figure 8. Le cycle sylvigénétique résumé en 5 phases (mosaïque de taches unitaires > 200 m²) (Rossi et Vallauri, 2013)

La capacité de stockage s'explique par l'important volume sur pied des forêts âgées. La densité de gros bois par rapport aux petits bois et bois moyens est très importante. Les gros arbres contribuent à 76 % de la biomasse totale (43 % du nombre de tiges) au sein des peuplements âgés (Luyssaert & al., 2008 ; Keith & al., 2014). Le stock de carbone étant proportionnel au volume (sur pied et souterrain car la biomasse souterraine suit le même profil que la biomasse aérienne), il augmente avec l'âge du peuplement (Lecoq & al., 2008 ; figure 9).

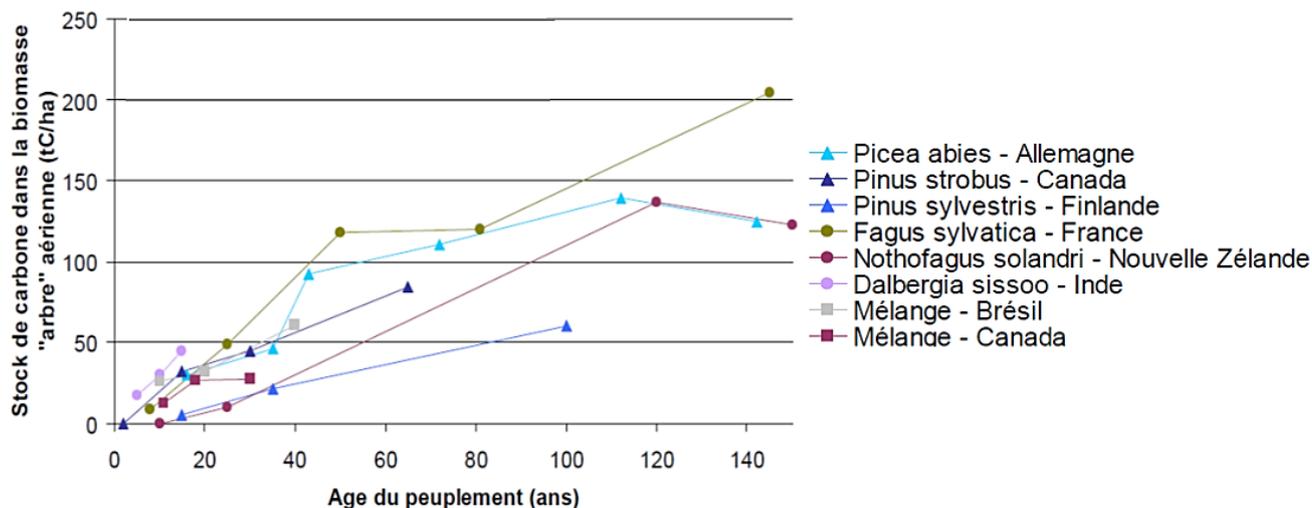


Figure 9. Stock de carbone dans la biomasse aérienne en fonction de l'âge du peuplement (Lecoq & al., 2008)

Les forêts âgées conservent également une vitesse d'assimilation du carbone comparable à celles des forêts jeunes. Certes, l'accroissement courant et l'accroissement moyen, au niveau de l'arbre, présentent une phase d'augmentation jusqu'à un optimum (variable selon l'essence et la station) puis décroissent progressivement (Lecoq & al., 2008 ; De Turkheim et Bruciamacchie, 2005). Cependant, les arbres de gros diamètre (> 100 cm) compensent en partie cette baisse de productivité par une surface foliaire plus étendue (Stephenson & al., 2014).

Au niveau du sol, l'impact de l'âge du peuplement sur l'augmentation du stockage de carbone est moins marqué. Ce compartiment est plus sensible à d'autres facteurs tels que l'histoire (ancienneté de l'état boisé), le climat, les conditions de station et le mode de gestion sylvicole. Toutefois, l'augmentation du volume de bois mort dans une forêt âgée non gérée (à haute naturalité) permet d'augmenter la part de carbone du sol.

Luyssaert & al. (2008) résumant leurs résultats (figure 10) ainsi « les forêts âgées sont en général des puits de carbone. Parce qu'elles accumulent du carbone pendant des siècles sans interruption, elles en contiennent de grandes quantités. Elles ne déstockeront pas ce carbone vers l'atmosphère si elles ne sont pas perturbées. » Par « non perturbées », Luyssaert & al. entendent un incendie, un défrichement ou une exploitation. Les perturbations naturelles (mortalité, chablis, etc.) entraînent une réorganisation du carbone dans les compartiments de l'écosystème, plus qu'un relargage dans l'atmosphère. Les perturbations naturelles sont le plus souvent à petite échelle (chablis), même s'il peut parfois se produire des événements d'une grande ampleur (tempête, incendie). En règle générale, la situation n'est pas comparable avec celle d'une phase de régénération après coupe rase, ni celle d'une jeune forêt recolonisant un ancien sol agricole. Ainsi, lorsqu'une perturbation naturelle amène un peuplement en phase d'écroulement, la forêt émet localement, et temporairement plus de carbone qu'elle n'en stocke, en raison de la plus faible biomasse aérienne sur pied. Toutefois, le volume de nécromasse, très important, constitue un apport de carbone conséquent vers le compartiment sol, qui n'a subi que peu de perturbations altérant son fonctionnement. Il subsiste en outre la régénération et le sous-étage qui ont une vitesse d'assimilation du carbone très élevée malgré une faible capacité de stockage.

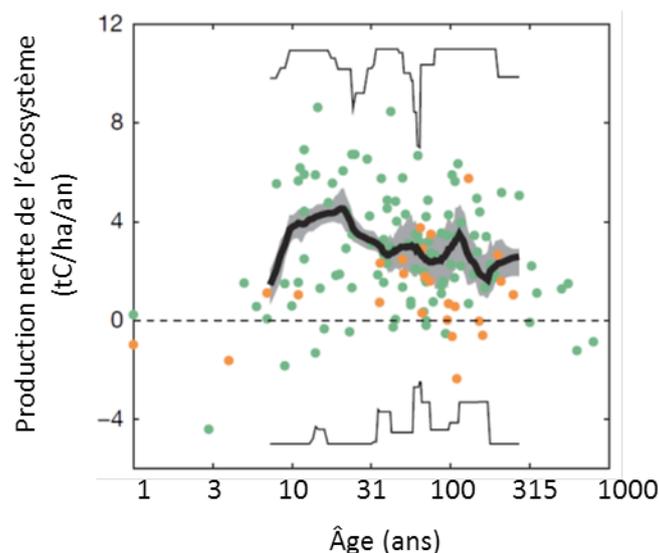


Figure 10. Évolution de l'augmentation annuelle du stock de carbone dans l'écosystème forestier en fonction de l'âge (d'après Luyssaert, 2008)

Les points verts représentent les forêts tempérées, les points oranges les forêts boréales. La zone grise représente l'intervalle de confiance à 95 % de la moyenne et les traits noirs fins les bornes de l'intervalle de confiance (observation individuelles).

La libre évolution ne permet cependant pas de répondre aux besoins en bois du pays. Il y a un équilibre à trouver pour que les cycles sylvicoles permettent un stockage du carbone optimal, tout en tenant compte des enjeux écologiques et sociaux. Chercher à optimiser l'accroissement (2^{ème} possibilité évoquée en introduction de cette partie), ne parait pas être une réponse adaptée à cette question.

En effet, si la coupe intervient à un âge proche de l'accroissement moyen annuel maximal, le stock moyen de carbone ne représente qu'à peine 1/3 du stock maximal que ce peuplement aurait pu atteindre à maturité (figure 11).

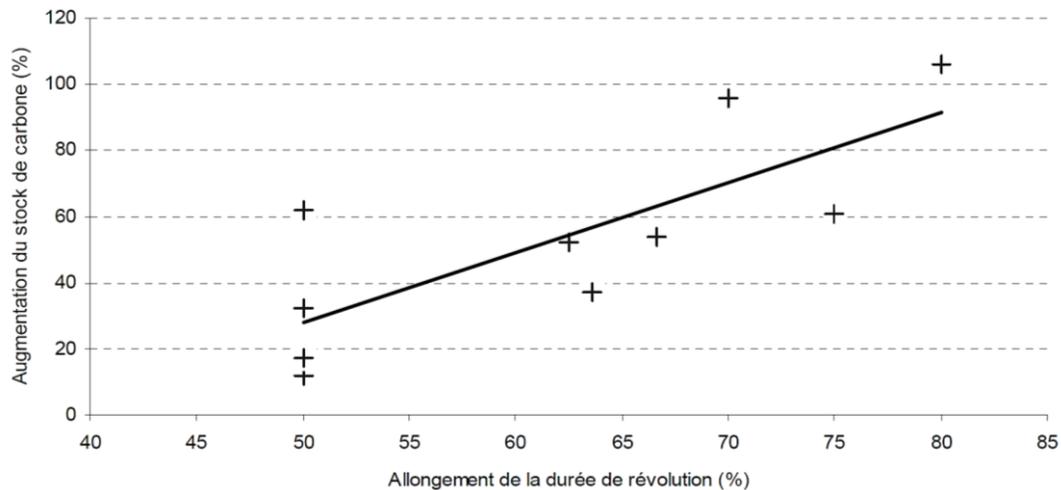


Figure 11. Relation entre allongement de la durée du cycle sylvicole et augmentation du stock de carbone sur pied en fin de cycle (d'après Lecoq & al., 2008)

Dans des hêtraies fertiles par exemple, on accroît le stock de bois sur pied de plus de 50 % en allongeant de 100 à 140 ans la durée du cycle (Dupouey & al., 2000, tableau 5). Cet écart se cumule au fil du temps. Sur le temps long (plusieurs cycles sylvicoles), la diminution du stockage de carbone dans le cas de cycles courts est encore plus flagrante, de 7 à 21 % du stock selon l'essence. Cette sylviculture « dynamique » a également un impact négatif à long terme sur les accroissements moyens en biomasse qui chutent, jusqu'à 27 % (Lecoq & al., 2008), et peuvent aller jusqu'à demander des apports compensatoires en engrais (d'origine fossile !).

Tableau 5. Stocks de carbone dans la biomasse aérienne en fonction de la durée du cycle sylvicole et du mode de gestion

La colonne « % référence la plus mûre » indique le % de stockage atteint avec un cycle court, en comparaison avec un cycle long.

Source	Peuplement	Caractéristiques	Mode de gestion	Durée du cycle sylvicole	Stock de carbone dans la biomasse aérienne	
					tC/ha	% référence la plus mûre
[1]	Hêtraie	Allemagne	Libre évolution depuis 40 ans		240	-
[2]	Hêtraie	France, bonne fertilité	Futaie régulière	140	138	65 %
				100	89	
[2]	Chênaie sessile	France, bonne fertilité	Futaie régulière	200	124	68 %
				140	85	
[3]	<i>Eucalyptus regnans</i>	Australie	Libre évolution (> 250 ans)		930	
			Coupe rase	150	204	
				50	113	55 %
[4]	Forêt de bois dur	Nord-Est États-Unis, dominé par résineux en mélange avec feuillus	Libre évolution		157	
			Coupe rase	120	74	47 %
				80	72	
			Futaie régulière	120	90	57 %
80	90					

[1] Mund et Schulze, 2006 (in Lecoq & al., 2008) ; [2] Dupouey & al., 2000 ; [3] Keith & al., 2014 ; [4] Nunery et Keeton, 2010

Le fait d'augmenter les prélèvements augmente certes le stockage de carbone dans les produits bois (seulement pour les produits à longue durée de vie). Ce phénomène est amplifié par la substitution de matériaux bois à d'autres plus consommateurs d'énergie (partie 3 et annexe). Toutefois, en termes de stockage de carbone, « *augmenter les âges d'exploitabilité est le moyen le plus rapide pour accroître la fonction de puits de carbone des forêts européennes.* » (Dupouey & al., 2000).

Choix de l'essence objectif

Les effets de la substitution d'une essence feuillue par une essence résineuse commencent à être étudiés. En dépit des différences observées parmi les résultats, la majorité des études tendent à montrer un impact négatif de la substitution d'une essence dominante feuillue par une essence dominante résineuse sur le stock de carbone, à la fois dans la biomasse et dans le sol.

Par exemple, la substitution du chêne (*Quercus petraea*) par le pin (*Pinus nigra*) entraîne une baisse du stock de carbone dans la biomasse de 40 tC/ha à l'échelle de temps d'un cycle sylvicole (Lecoq & al., 2008). Ou encore celle de l'épicéa (*Picea abies*) par des feuillus (hêtre -*Fagus sylvatica*- et chêne -*Quercus robur*-) à hauteur de 23 % du volume sur pied, conduit à une augmentation du stock de carbone dans le sol (entre 5 et 24 tC/ha selon le modèle utilisé) (Seidl & al., 2008).

La substitution de feuillus par des résineux permet de stocker plus de carbone uniquement dans des contextes très particuliers (stations de faible fertilité et terrain convenant au développement de peuplements résineux), si les feuillus sont gérés de manière très intensive, et les résineux avec des rotations longues (Vallet, 2005). Le respect de la station est donc primordial.

Ainsi, pour la majorité des cas, « *si l'accroissement en carbone est plus rapide chez les résineux que les feuillus, la différence s'amenuise à partir de 70 ans et s'inverse dans les futaies âgées (au-delà de 140 ans).* » (Dupouey & al., 2000 ; Vallet, 2005). Autrement dit, la substitution de feuillus par des résineux n'augmente que temporairement la vitesse d'assimilation du carbone par l'écosystème mais diminue sa capacité de stockage sur le long terme.

Dans le sol, la quantité de carbone varie plus en fonction des essences que de la distinction feuillu/résineux. Les situations sont également différentes selon que l'on considère les humus ou les autres horizons du sol (figure 12).

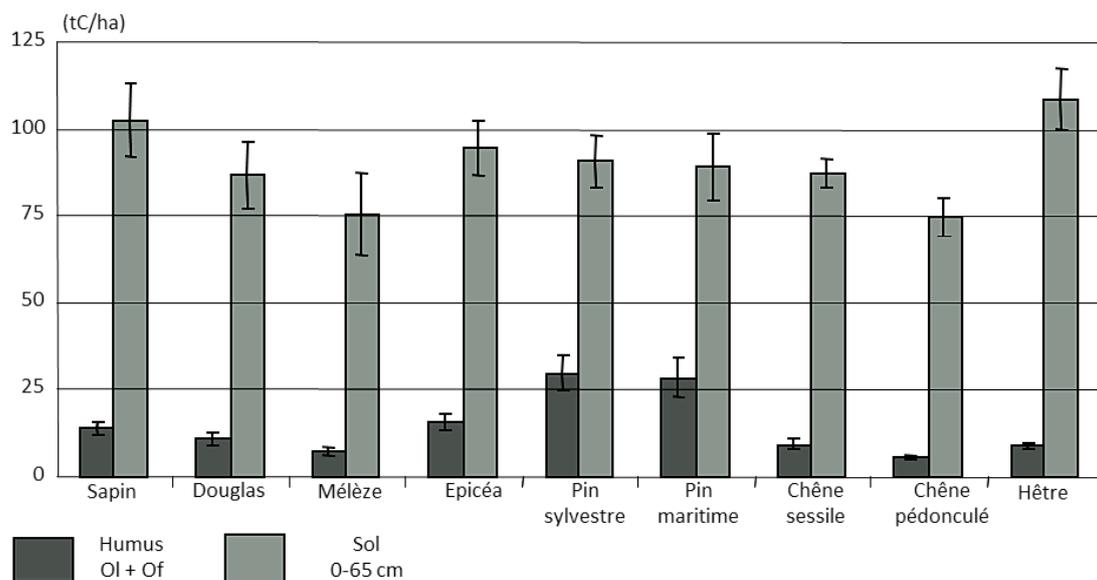


Figure 12. Taux de carbone dans les sols et les humus pour quelques essences françaises (Nys & al., 2002)

Structure du peuplement

La complexité structurale d'un peuplement forestier naturel favorise le stockage du carbone.

Les peuplements multi-stratifiés optimisent mieux le stockage du carbone relargué au sein même de l'écosystème forestier par la respiration hétérotrophe. Environ 25 % du CO₂ dégagé du sol est repris soit par le sous-bois (5 %), soit par la canopée (20 %) (Pesson, 1974 ; Saugier, 2009), constituant ainsi un cycle du carbone interne à l'écosystème forestier.

L'étude de Dupouey & al. (2000) va également dans ce sens « *L'installation de peuplements multi-étagés, en particulier sous les espèces de lumière (pin sylvestre, chêne pédonculé), ou dans les peuplements ayant subi des ouvertures (dépérissements par exemple) pourraient accroître le stock sur pied.* »

Seidl & al. (2008) prennent l'exemple d'une pessière autrichienne, soumise à 4 scénarii de gestion, et 3 scénarii climatiques *via* l'utilisation de 2 modèles (PICUS et 4C). Quels que soient le scénario climatique et le modèle choisis, les 2 scénarii les plus efficaces en termes de stockage du carbone sont :

- le scénario de référence (libre évolution du peuplement, le bois mort est laissé en place),
- le scénario de gestion en futaie irrégulière (éclaircies pour structurer le peuplement dans sa jeunesse, puis récolte tous les 10 ans).
- Viennent ensuite le scénario d'une conversion de la pessière en peuplement mélangé (rotation de 80 ans pour l'épicéa, plantation de hêtre en sous-étage pour atteindre environ 20 % de mélange), et le scénario de gestion classique (peuplement équien pur d'épicéa, rotation de 90 ans, éclaircie à 20 ans).

Des résultats similaires sont obtenus pour Nunery et Keeton (2010) qui comparent différents scénarii de gestion sylvicole de peuplements tempérés nord-américains. Les peuplements traités en irrégulier stockent 33 % de carbone de plus que les peuplements traités en futaie régulière (figure 13).

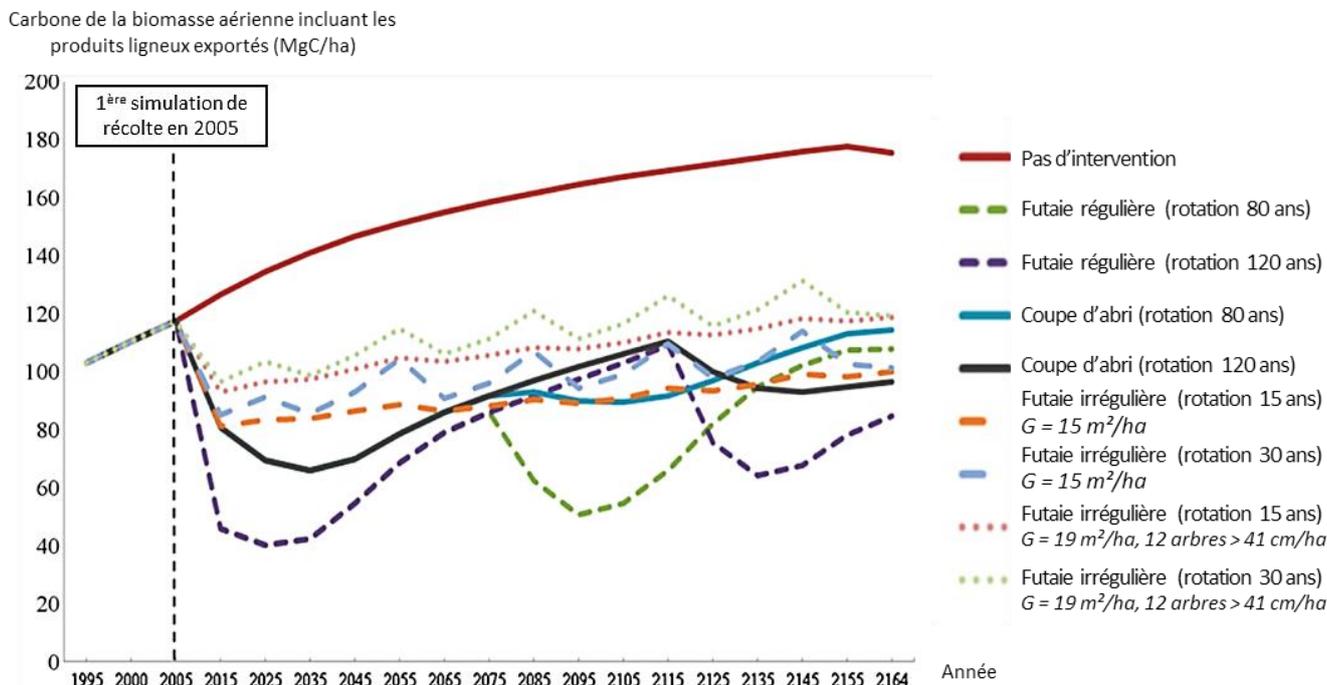


Figure 13. Simulation de 9 scénarios de gestion pour des peuplements tempérés nord-américains (Nunery et Keeton, 2010)

Les données représentent des valeurs moyennes sur 10 ans pour 32 peuplements. Le stock de carbone inclue la biomasse aérienne vivante, le bois mort, et les produits ligneux exportés.

Les avantages conférés à la futaie irrégulière ne se limitent par ailleurs pas au stockage du carbone : un peuplement multi-stratifié est également plus favorable à la biodiversité (Larrieu et Gonin, 2008 ; Rossi & *al.*, 2013), plus résilient au changement climatique, et produit un bois de meilleure qualité (De Turckheim et Bruciamacchie, 2005). Cela sera développé en conclusion.

Coupes rases et définitives

Tout prélèvement en forêt a un impact, tant sur le stock de carbone de la biomasse aérienne, que sur celui du sol. Le cas des coupes rases (taillis, futaie régulière) est le plus flagrant.

Plusieurs études ont montré que la quantité de carbone stockée dans le sol diminue drastiquement après une coupe rase, du fait de l'exportation de matière mais aussi de la minéralisation de la matière organique du sol (Citeau & *al.*, 2008)(figure 14). Les coupes rases entraînent en effet une ouverture du couvert forestier : l'humus, qui n'est plus protégé par la canopée, va se réchauffer ; l'effet litière s'estompe. L'augmentation de l'activité des champignons décomposeurs est massive et le relargage de CO₂ peut être de 2 à 3 fois supérieur (Dommergues et Mangenot, 1970) à la situation avant coupe. Les mycorhizes et les racines fines finissent par disparaître dans la zone ouverte (Amaranthus, 1992). Le déstockage de carbone s'effectue d'abord dans les horizons supérieurs, et décroît avec la profondeur (jusqu'à 60 cm), où les composés carbonés labiles sont moins présents (Buchholz & *al.*, 2013).

La diminution du stock de carbone est moins importante dans les peuplements de résineux que pour les feuillus : les résineux produisent en effet une litière avec des composés peu labiles, présentant un haut ratio C/N, contrairement aux feuillus pour lesquels la dynamique de décomposition est bien plus élevée (Gershenson & *al.*, 2011).

Après une coupe rase, il faut entre 50 et 75 ans selon les essences et les types de sols pour que le stock de carbone du sol revienne à son état avant coupe (plusieurs centaines d'années pour certains peuplements des régions boréales, entre 8 et 60 ans après la récolte pour une coupe rase d'après Buchholz & *al.*, 2013 ; entre 20 et 30 après une récolte d'après Gershenson & *al.*, 2011). Si la durée des cycles sylvicoles est inférieure à ces valeurs, les peuplements deviennent des sources de carbone, de plus en plus importantes selon que l'on considère des pas de temps incluant plusieurs cycles (Gershenson & *al.*, 2011).

Éclaircies : intensité et fréquence

Les éclaircies ont un moindre impact, bien qu'elles induisent une modification du microclimat forestier (plus de lumière arrive au sol, augmentation de la température, stimulation de l'activité des micro-organismes du sol). Elles réduisent temporairement la quantité de matière organique qui arrive au sol, que ce soit via les apports de litière ou les apports par la rhizosphère. Toutefois, les coupes d'éclaircie permettent aux arbres restant d'augmenter leur accroissement courant, via l'extension de leur houppier et de leur surface foliaire (F.X. Nicot, com. pers.). La perte de matière organique est donc rapidement compensée (Lemée, 1987). Cet impact peut être par ailleurs limité par le maintien des rémanents en forêt, qui permettent de conserver des températures et une humidité propices à l'activité microbienne (voir ci-après).

L'intensité et la fréquence des éclaircies impactent les stocks de carbone. Au niveau de la biomasse aérienne, ils sont plus importants dans les peuplements éclaircis moins fortement (surface terrière minimum de 19 m²/ha, maintien de 12 gros bois/ha) que dans des peuplements gérés de façon plus dynamique (surface terrière minimum de 15 m²/ha, aucun arbre dépassant le diamètre d'exploitabilité n'est conservé) (figure 13) (Nunery et Keeton, 2010 ; Lecoq & *al.*, 2008). De même que pour les coupes, plus la fréquence des éclaircies est élevée, plus forte sera la diminution du stock de carbone (un pas de temps minimal de 10 ans est à préconiser, Gershenson & *al.*, 2011). En outre, des éclaircies fortes sur des tiges de faible diamètre n'engendrent que des produits bois de faible qualité à durée de vie courte (bois énergie, bois d'industrie).

Fertilisation et travail du sol

La fertilisation, au niveau de stations pauvres, où certains éléments minéraux peuvent constituer un facteur limitant de l'accroissement de la biomasse, a un effet positif sur le stock de carbone de la biomasse aérienne en permettant d'augmenter la production.

Les impacts sur le stock de carbone du sol sont plus variables (Lecoq & *al.*, 2008 ; Gershenson & *al.*, 2011). Globalement, les effets sont les mêmes que ceux des dépôts azotés détaillés en fin de partie 1. L'azote limite la minéralisation carbone du sol en modifiant la communauté microbienne (en faveur des décomposeurs de matière organique riches en carbone et faciles à dégrader). De plus, l'apport d'azote à une litière riche en lignine favoriserait la constitution de matières organiques résistantes à la dégradation (Ferry & *al.*, sous presse). Ainsi, si l'apport d'azote favorise la dégradation des composés organiques labiles, la stabilisation des formes les plus récalcitrantes de composés carbonés suffirait à compenser cette perte de carbone. Des effets similaires sont observés en maintenant des espèces fixatrices d'azote en sous-étage (Gershenson & *al.*, 2011).

Concernant la préparation du sol, les techniques employées, mécaniques ou manuelles, induisent la remontée des horizons minéraux (suppression des horizons organiques ou mélange avec les horizons plus profonds), et augmentent la respiration du sol du fait de l'utilisation de molécules labiles, protégées au sein des agrégats (Dommergues et Mangenot, 1970). Ces perturbations physiques engendrent une modification importante du milieu qui conduit à la réduction des stocks de carbone du sol, particulièrement sur sols sableux (Lecoq & *al.*, 2008). Ces effets sont visibles sur le très long terme (les sols des forêts anciennes contiennent plus de carbone que celui des forêts récentes). Le dessouchage est bien entendu une opération extrêmement perturbante pour l'écosystème forestier (figure 14), causant autant de dommages qu'un labour agricole en plein.

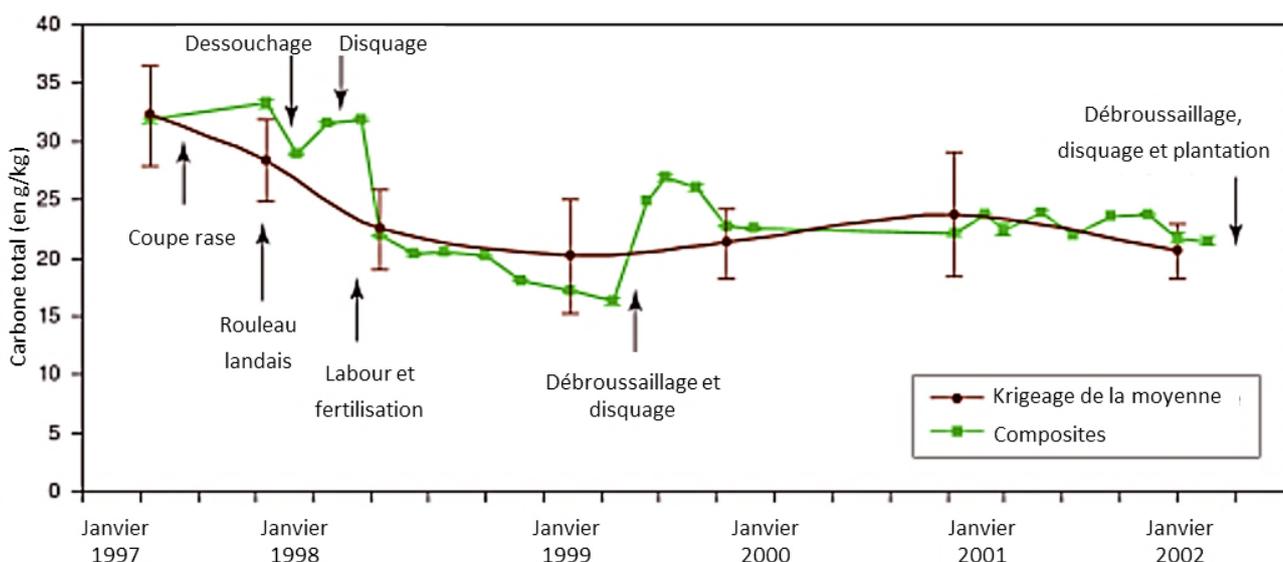


Figure 14. Évolution des teneurs en carbone organique total dans le sol après une coupe rase (Landes) (Jolivet, 2000 in Citeau & *al.*, 2008)

Gestion des rémanents

La gestion des rémanents est importante si l'on souhaite avoir une gestion efficace du stock de carbone, notamment dans le sol (Dupouey & *al.*, 2000 ; Dodelin & *al.*, 2008 ; Seidl & *al.*, 2008 ; Gershenson & *al.*, 2011).

Si l'on regarde ce qu'il se passe sur le court terme après une coupe, le stock de carbone global de l'écosystème diminue de 6 % en moyenne lorsque l'ensemble des rémanents est exporté. En revanche, conserver les rémanents en forêt permettrait de réduire cette diminution.

Les stocks sont supérieurs de 24 % en moyenne pour les peuplements de conifères évalués. Sur le long terme (300 ans), l'analyse est encore plus frappante : l'exportation des rémanents diminue le stock de carbone de l'écosystème forestier, à la fois dans la biomasse et dans le sol. Cet impact est d'autant plus fort que la station est pauvre (de 14 % pour une bonne station à 52 % pour une station pauvre) (Lecoq & al., 2008 ; Gershenson & al., 2011). À l'échelle de l'ensemble de l'écosystème forestier, c'est une baisse de 17 % du stock de carbone qui est observée par Jiang & al. (2002) lorsque les rémanents sont exportés (in Lecoq & al., 2008).

De même que pour les autres caractéristiques du peuplement (âge, structure), la gestion des rémanents n'a pas qu'un impact sur le stockage du carbone mais également sur la biodiversité et la fertilité des sols, et ce faisant sur la productivité de l'écosystème.

En conclusion, les stocks de carbone des écosystèmes forestiers, tant au niveau des sols que de la biomasse, sont fortement impactés par l'histoire de la gestion et des usages des sols. La carte de France des stocks de carbone dans la biomasse en forêt de production en est une très bonne illustration (figure 15). Les stocks les plus élevés sont principalement localisés dans les futaies à cycle sylvicole long (notamment les futaies feuillues du Nord-Est de la France)(Loustau, 2001). Ces forêts sont pour la plupart des forêts anciennes, dont les sols n'ont été que peu perturbés depuis des centaines d'années. En termes d'essence, les plus forts stocks par unité de surface sont les sapinières (87 tC/ha) et les hêtraies (84 tC/ha), et les plus faibles les peuplements de feuillus ou résineux divers (42 tC/ha), et de douglas (45 tC/ha) (Dupouey & al., 2000). Toutefois, cet effet de l'essence ne peut pas être dissocié de l'effet de l'âge du peuplement : les sapinières et les hêtraies sont des forêts plus matures que les plantations résineuses, qu'elles soient exploitées selon des cycles sylvicoles longs, ou en libre évolution, notamment dans certaines régions de montagne.

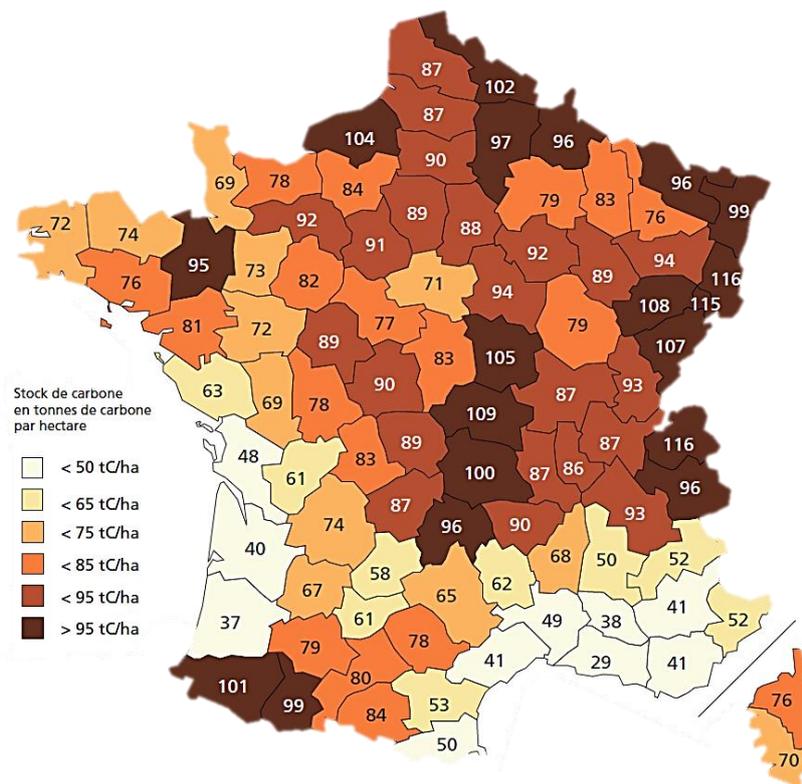


Figure 15. Carte du stock de carbone aérien et racinaire en tC/ha en forêt de production sur la période 2008-2012 (IGN, 2014)

Rhône-Alpes en exemple

Des forêts rhônalpines diverses et multifonctionnelles

La région Rhône-Alpes est particulièrement variée en termes de contextes bioclimatiques : domaine méditerranéen (partie de la Drôme, Ardèche), continental (Rhône, Ain, Loire, avant pays de l'Isère), régions de montagne (Savoie, Haute-Savoie, Isère). Les forêts rhônalpines sont particulièrement diversifiées. De plus, la part des futaies irrégulières est importante (14 %), largement supérieure à la moyenne nationale (5 %). L'accessibilité limitée de certains territoires (seulement un quart des forêts sont faciles à exploiter, les 2/3 étant classés comme difficiles à exploiter) ; et le morcellement de la forêt privée (76 % des forêts rhônalpines) limitent l'exploitation. La qualité bois d'œuvre est la plus représentée dans la région (la qualité des résineux étant supérieure à celle des feuillus).

La politique forestière au niveau de la région est notamment animée via deux projets complémentaires, qui auront des répercussions sur la multifonctionnalité et le stockage du carbone : le projet FRENE¹ (Forêts Rhônalpines en Évolution Naturelle) et le projet Sylv'actes.

Le projet FRENE

En 2010, un « Plan d'actions pour la constitution d'un réseau de forêts en évolution naturelle en Rhône-Alpes » a été signé par les associations naturalistes (LPO, FRAPNA, Forêts sauvages), les communes forestières, l'ONF, les forestiers privés et le Préfet de Région. Ce projet FRENE vise à mettre en place, à l'échelle régionale, une trame de forêts en libre évolution, représentant au moins 10 % du territoire. Il permettra d'acquérir les connaissances nécessaires à la conservation d'espèces protégées et à l'optimisation du rôle écologique global du continuum forestier. Il inclue en forêt publique, les îlots de sénescence, établis lors de la révision du plan d'aménagement, et les réserves biologiques intégrales ; en forêt privée, tout propriétaire volontaire souhaitant intégrer une partie de sa forêt dans le réseau. Ce projet participe à la mise en place, au niveau national, des schémas de cohérence écologique et de la trame verte et bleue. Le stockage de carbone dans ces écosystèmes forestiers en évolution naturelle est optimisé (stocks sur pied et stocks dans des sols non perturbés).

Le projet Sylv'actes

Il a été initié par une délibération de la région Rhône-Alpes du 31 mai 2013. L'objectif de ce projet est de construire une nouvelle approche permettant d'accompagner financièrement une gestion forestière qui, au-delà de la production de bois d'œuvre, optimise les services écosystémiques identifiés comme localement prioritaires, et notamment le stockage de carbone. Des projets sylvicoles de territoire (PST) sont ainsi développés. Actuellement 7 territoires ont été désignés comme pilotes (le massif du Bugéy, l'Ardèche verte, le Pilat, le bassin de Montélimar, le Diois, les Chambaran et le pays du Mont-Blanc). Les objectifs à 5 ans sont de valider 35 Projets sylvicoles territoriaux, d'inscrire 10 000 hectares de forêts gérés durablement dans la démarche, et d'atteindre un bénéfice d'atténuation de 0,5 MtCO₂ séquestrées ou évitées (soit 0,14 MtC). Ce bénéfice représente 1,3 % des émissions annuelles totales de CO₂ en Rhône-Alpes.



¹ Plus d'informations : refora.online.fr / www.territoiresforestiers-rhonealpes.eu

Partie 3. Des filières de production optimisées

Les produits ligneux constituent une ressource potentiellement renouvelable à l'échelle de quelques générations humaines si les forêts sont bien gérées). La production du bois, comme sa consommation, peuvent en outre présenter une empreinte carbone plus faible que d'autres alternatives (par exemple le bois vs béton ou acier).

C'est donc une ressource intéressante à exploiter si l'on souhaite faire des économies d'émissions de carbone, sous certaines conditions. Il est capital de :

- Commencer par réduire nos besoins et notre consommation en produits carbonés (développement de l'économie circulaire, amélioration de l'efficacité énergétique à tous les niveaux, développement de la substitution de matériaux par le bois).
- De hiérarchiser les usages du bois. La production des produits bois doit être optimisée en augmentant la part des produits à forte valeur de substitution carbone, et à forte valeur économique (bois d'œuvre > bois d'industrie > bois énergie), et en limitant les pertes.
- De gérer durablement les forêts dont sont issus ces produits bois.

La question de la pérennité de la ressource, que ce soit en forêt ou comme produit est cruciale pour les choix de gestion.

Les produits bois en France métropolitaine

En France métropolitaine, en 2012, 35 Mm³ (volume sur écorce) ont été commercialisés (FCBA, 2014). Il faut ajouter à ces statistique nationales et officielles la récolte de bois de feu, qui est estimée à 21 Mm³/an (Solagro & al., 2013, in FCBA, 2014). La récolte totale des bois français métropolitains est donc de 56 Mm³/an de bois, pour une production annuelle de 86,7 Mm³/an (FCBA, 2014 ; IFN, 2010, figure 16).

En 2012, la moitié de la récolte commercialisée est destinée à la filière bois d'œuvre (1/3 de la récolte totale). Cette filière a un rendement de 50 %, les pertes étant réutilisées par les filières bois d'industrie (1/3 de la récolte commercialisée) et bois énergie (16 % de la récolte commercialisée) (FCBA, 2014 ; Magrum et Lerat, 2011).

En termes de stock de carbone, le volume exporté de la forêt française métropolitaine représente environ 20 MtC/an (coefficients utilisés d'après Dupouey & al., 2000) :

$$\begin{aligned} & \mathbf{[14 \text{ Mm}^3 \text{ de feuillus et peupliers} \times 0,43] + [21,1 \text{ Mm}^3 \text{ de résineux} \times 0,29]} \\ & \mathbf{+ [21 \text{ Mm}^3 \text{ de bois de chauffage} \times 0,37] = 19,9 \text{ MtC/an}} \end{aligned}$$

Des résultats quasiment identiques sont obtenus par la CITEPA (Fontelle & al., 2014) : 19,2 MtC/an.

Il faut de plus tenir compte des volumes importés et exportés hors du territoire. En 2011, 7,4 Mm³ de bois d'œuvre et d'industrie ont été importés et 10 Mm³ exportés. Les pertes d'exploitation des bois transformés exportés restent sur le territoire français, tandis que les pertes d'exploitations des bois transformés à l'étranger ne sont pas comptabilisées à l'échelle française. L'équivalent en carbone de la balance commerciale au niveau de la filière papier-cartons n'a pas été calculé en raison des difficultés de conversion de ces matières en stocks de carbone. On note cependant que cette filière est déficitaire avec une importation de 7 Mt/an de pâte ou de papiers-cartons pour 5 Mt/an exportés. Globalement, la balance commerciale de la filière bois française est quasiment à l'équilibre en termes de carbone. Nous verrons en conclusion qu'il n'en est pas de même au niveau économique.

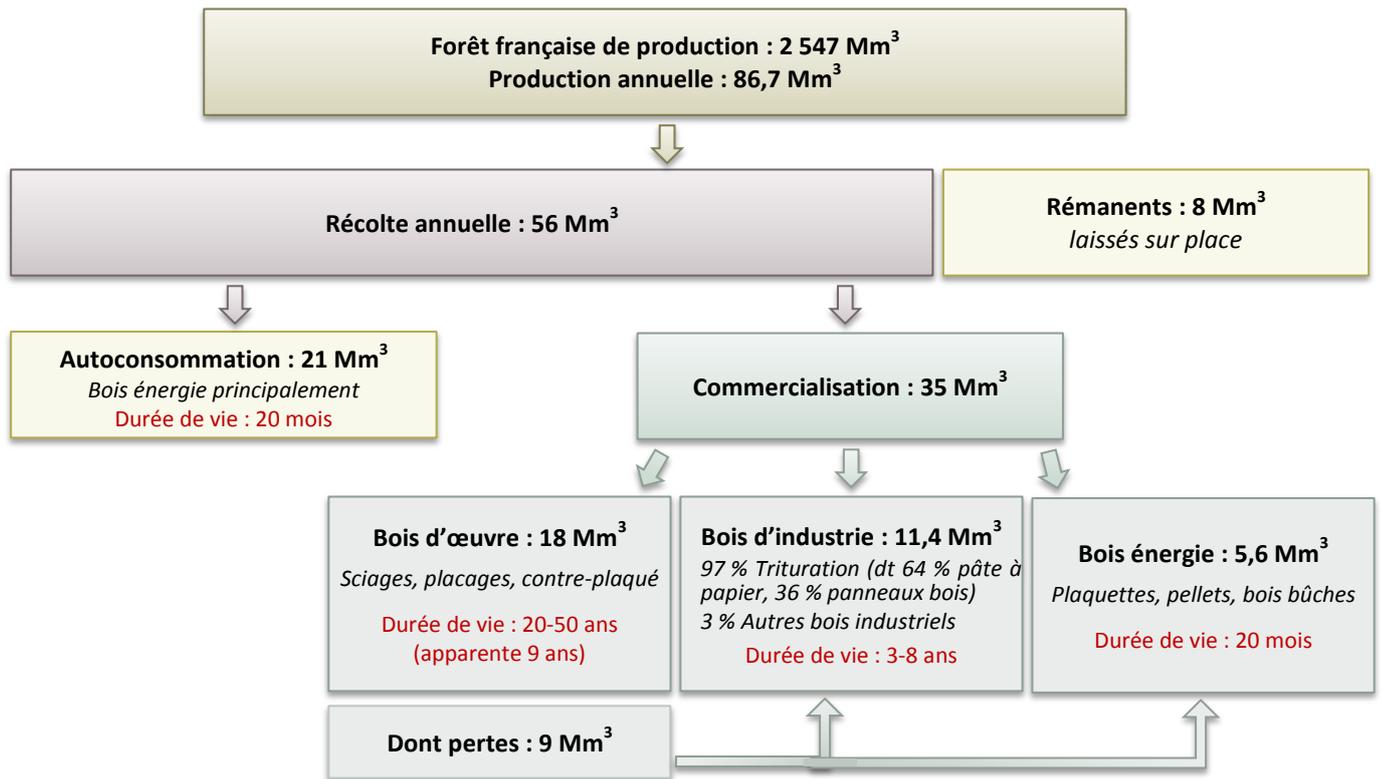


Figure 16. Les volumes de bois récoltés en France répartis par usages (volume sur écorce, d'après Deheza et Bellassen, 2010 ; FCBA, 2014 ; les durées de vie sont reprises de Vallet, 2005).

Toutefois, si l'on souhaitait être tout à fait exact dans les calculs du stock des produits bois, il faudrait également tenir compte du coût carbone des travaux liés à l'exploitation et à la transformation. Tout au long de la filière, il y a en effet des émissions de CO₂ :

- Lors des opérations de gestion et d'exploitation forestière (ouverture et entretien des dessertes, améliorations du peuplement, martelage, coupe, extraction du bois, transport des grumes, etc.) ;
- Lors des opérations de première transformation (séchage, courbure, transport des produits, etc.) ;
- Lors des opérations de deuxième transformation (collage, pressage, transport des produits finis, etc.)

Il est difficile de donner des estimations précises de ces coûts carbone, car beaucoup de paramètres sont variables. Mais il faut prendre conscience que toute activité génère des émissions de carbone dont il faut tenir compte dans les bilans. L'analyse des cycles de vie, de la forêt aux produits finis, permet de prendre en partie en compte ces émissions de carbone.

Les multiples vies d'un produit bois

La méthodologie de l'Analyse de Cycle de Vie (ACV) est une approche par flux sur le cycle de vie du produit, utiles pour les réflexions autour de l'économie circulaire (voir encadré). Elle sert surtout à optimiser les process, réduire l'impact de la filière bois en termes d'émissions de CO₂, énergie, eau, matière, etc., selon l'indicateur que l'on souhaite suivre.

L'économie circulaire (d'après Bardy, 2014)

L'économie circulaire se propose non seulement de réduire les impacts environnementaux de l'activité économique, mais aussi de passer à un modèle de création de valeur vertueux sur le plan social, économique et environnemental. Elle s'inspire du fonctionnement des écosystèmes naturels. Son objectif est de parvenir à la croissance économique sans l'épuisement des ressources naturelles, notamment grâce à l'innovation. Il s'agit par exemple de prolonger les flux de matière (réemploi, recyclage) et de produits (écoconception sans produits toxiques ni obsolescence programmée, réparation, réutilisation puis recyclage). L'économie circulaire appelle à une reterritorialisation de l'économie, au développement local et à la création d'emplois non délocalisables. Selon le cabinet McKinsey, l'économie circulaire permettrait de réaliser une économie nette minimale de 280 milliards d'euros par an en matières premières en Europe.

Un produit bois, de sa création à sa fin de vie, passe par toute une série d'étapes qui peuvent capter, stocker ou déstocker du carbone. Le recyclage a un impact très fort sur le cycle de vie des produits. A titre d'exemple, la figure 17 présente le cycle de vie d'un produit bois utilisé dans la filière construction. Elle indique des durées de vie des produits finis. Ces durées de vie ne tiennent pas compte des pertes qu'il y a eu pour passer de la grume aux produits finis (Vallet, 2005).

Ainsi, si l'on prend un un exemple simple d'un produit bois avec une durée de vie de 20 ans, pour lequel on a un rendement de 40 % (1^{ère} et 2^{ème} transformations incluses), la durée de vie des pertes (60 %) est estimée à 2 ans, ce produit bois aura une durée de vie apparente de 9 ans :

$$\text{Durée de vie apparente} = \% \text{ utilisé} \times \text{Espérance de vie du produit fini} + \% \text{ pertes} \times \text{Espérance de vie des pertes}$$
$$\text{Soit } [40 \% \times 20] + [60 \% \times 2] = 9,2 \text{ ans}$$

Le recyclage des produits des filières ameublement, construction et emballage confère une durée de vie supplémentaire plus ou moins importante à ces produits, en fonction de leur utilisation dans les filières bois d'industrie (panneau), papier ou bois de feu.

La substitution par le recyclage : l'exemple du papier (d'après Bardy, 2014)

Les achats de papier recyclé sont encore minoritaires dans bien des entreprises privées comme publiques, et pourtant, la production de papier recyclé représente un gain de l'ordre de 90 % d'économie d'eau, une dépense énergétique divisée par trois et un taux d'émission de CO₂ réduit de moitié même en considérant toutes les opérations amont nécessaires de collecte et de tri. Pour produire une tonne de pâte à papier recyclé, on économise 1 000 kg de bois, 7 m³ d'eau, 6 000 kWh, 1 400 kg de déchets par rapport à du papier issu uniquement de fibres vierges. De plus, la boucle vertueuse du recyclage mobilise 250 emplois en moyenne pour le traitement de 10 000 tonnes de déchets, alors que son incinération ou sa mise en décharge n'en mobilise que 40 et 10 respectivement (Le Moigne, 2014, in Bardy, 2014). L'évolution de la filière recyclage en France est positive bien que les taux restent inférieurs à ses voisins européens : 49 % du papier/carton est recyclé en France (usages domestiques), contre 75 % en Allemagne et 69 % au Royaume-Uni.

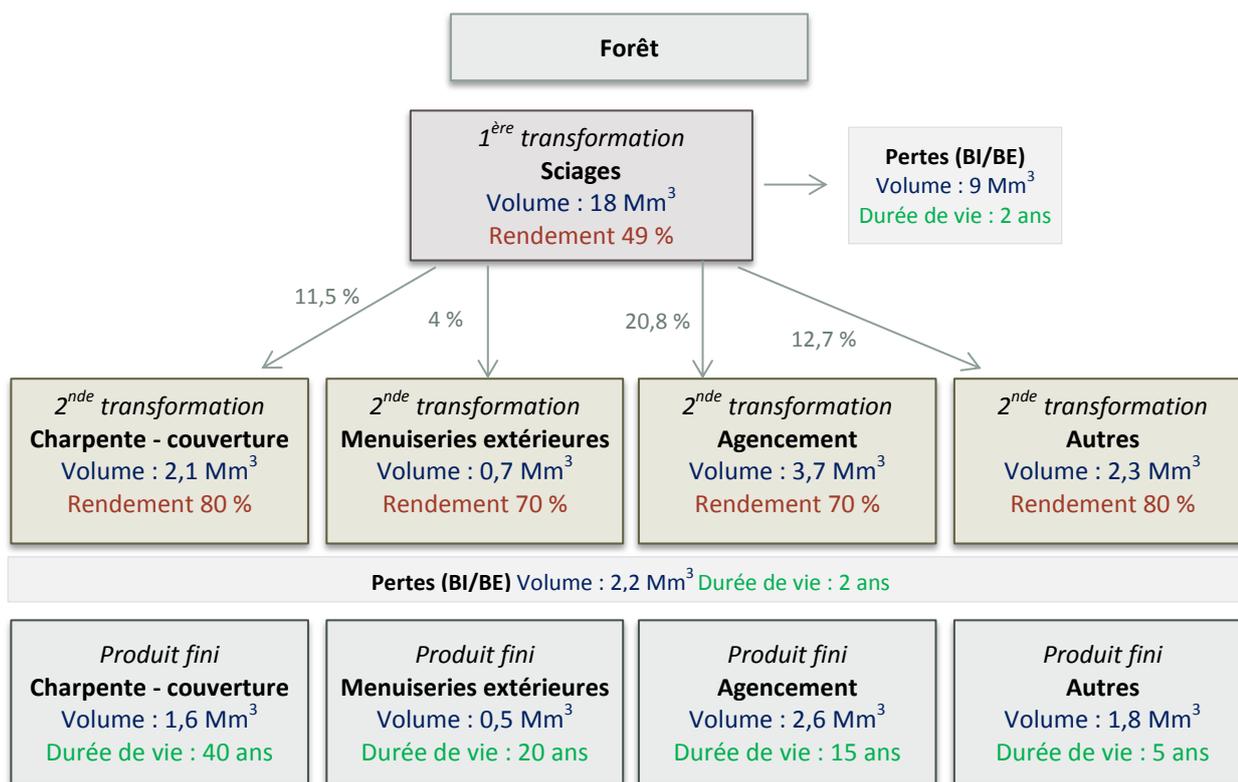


Figure 17. Analyse du cycle de vie d'un produit de construction bois (d'après Vallet, 2005)

La catégorie « Autres » rassemble des produits bois à moindre durée de vie tels que les bois de coffrage et d'échafaudages utilisés en construction, ou à durée de vie plus longue tels que les traverses de chemin de fer ou les étalements. Les volumes utilisés sont ceux de la récolte de 2012 (FCBA, 2014).

Les durées de vie ont été estimées dans plusieurs études en fonction des 5 sous-filières majeures à considérer : bois énergie, papiers-cartons, emballage bois (type palettes, cagettes), ameublement, construction (tableau 6).

Tableau 6. Durées de vie des produits issus des 5 sous-filières

Attention ! Seul Vallet (2005) mentionne des durées de vie apparentes qui incluent à la fois le rendement et le recyclage en plus du temps de vie en œuvre des produits finis. Les autres durées de vie (*) n'en tiennent pas compte.

Durée de vie (années)	Vallet, 2005	Picard, 2006	FCBA, 2013	Taverna & al., 2007
Bois énergie	1,6	-	0,1- 2	2
Papiers/cartons	2,4	2-5	0,1 - 1,3	-
Panneaux / Emballage	3,9	-	0,1 - 8	-
Construction	9,1	-	-	-
<i>Charpente</i>	-	20-50*	75*	80*
<i>Menuiserie</i>	-	-	20*	30*
Ameublement	8,5	-	5-25*	50*

Les effets de la substitution par l'usage du bois

La plupart des études qui considèrent qu'une jeune forêt exploitée stocke plus de carbone qu'une vieille forêt en évolution naturelle (notamment Taverna & al., 2007) accordent une large part aux effets de la substitution du bois pour des produits concurrents.

Quelques points méritent d'être soulignés avant de détailler le sujet :

- L'effet positif de la substitution est fortement dépendant de l'usage qui est fait du bois. Ainsi, la substitution du bois à un autre matériau n'est pas comparable, en termes d'efficacité, avec une substitution du pétrole/charbon par le bois pour fabriquer de l'énergie.
- L'effet substitution est intéressant au niveau social (maintien et création d'emplois localement) et écologique (promotion de la gestion et de l'exploitation forestière vs les industries lourdes de l'aluminium, du béton ou autres).
- La meilleure des substitutions reste l'économie des matières premières en améliorant par exemple :
 - le recyclage (voir encadré ci-après), s'il tend à se développer pour la filière papier, il est quasiment inexistant pour toutes les autres sous-filières ;
 - l'isolation des habitations (à l'aide de produits bois, ce qui diminuerait le gaspillage énergétique, notamment de bois énergie).
- Enfin, l'effet substitution en termes de carbone est plus mathématique que biologique. Le CO₂ est émis dans l'atmosphère et contribue au changement climatique, qu'elle que soit la ressource carbonée consommée. Dans un cas, il mobilise un stock de carbone ancien (pétrole ou charbon, ce dernier étant également d'origine forestière), dans l'autre, il mobilise un stock de carbone provenant de forêts actuelles, renouvelable à l'échelle de quelques générations humaines contrairement au précédent.

Ceci étant rappelé, l'intérêt de la substitution sera détaillé ci-après pour deux usages : le bois comme matériau, et le bois comme source d'énergie.

Le bois comme matériau

Les émissions de CO₂, et plus généralement des gaz à effet de serre (GES) sont moindre, à volume équivalent, pour produire des matériaux à base de bois que des matériaux concurrents tels que le béton, l'acier, l'aluminium ou le plastique. Ainsi, dans le secteur de la construction, l'utilisation d'1 m³ de bois permet d'éviter les émissions de 0,8 tCO₂ soit 0,218 tC (Chenost & Rubio, 2008 ; Taverna & al., 2007).

Il est nécessaire de tenir compte des rendements des filières bois d'œuvre et bois d'industrie (tableau 7). Chaque année, 18 Mm³ entrent dans la filière bois d'œuvre, mais seuls 9 Mm³ sont utilisés comme tel (Vallet, 2005). Si l'on considère le bois d'industrie, seul le bois de trituration destiné à la fabrication de panneaux (34 %), et les autres bois d'industrie (3 %), peuvent avoir un rôle de substitution (rendement de 88 % ; Vallet, 2005). Si l'on considère que l'ensemble de cette production vient en substitution d'autres matériaux, on obtient une économie de 3,2 MtC/an.

Tableau 7. Quantité de carbone économisée par la substitution du bois comme matériau

Les coefficients de conversion utilisés sont ceux de Dupouey & al. (2000) soit 0,43 pour les feuillus et 0,29 pour les résineux. Il a été considéré que les panneaux représentent 34 % du volume total du bois d'industrie et les autres bois d'industrie 3 % (FCBA, 2014). Les rendements sont issus de Vallet (2005). On considère que l'utilisation d'un m³ de bois d'œuvre permet d'économiser 0,218 tC (Chenost & Rubio, 2008 ; Taverna & al., 2007).

	Production Feuillus Mm ³	Production Résineux Mm ³	Production totale Mm ³	Produits finis		
				Rendement	Mm ³	MtC
Bois d'œuvre	4,9	13,1	18,0	50%	9	2
Panneaux et autres bois d'industrie	1,7	2,4	4,1	88%	5,8	1,2
Total	6,6	15,5	22,1		14,8	3,2

Avec 22,1 Mm³ en entrée de filière pour une économie de 3,2 MtC, le taux de rentabilité de substitution par le bois d'autres matériaux est de 22 %.

La part de bois utilisé comme matériau de substitution pourrait être considérablement augmentée. Le bois d'œuvre ne représente actuellement qu'un quart de la récolte (figure 16). Il serait possible d'augmenter cette part avec une gestion mettant la priorité sur cette production (voir annexe). Une amélioration des rendements et du recyclage permettrait d'allonger les durées de vie apparente des produits.

La promotion du bois est à faire car il constitue, lorsqu'il est issu de forêts bien gérées, un matériau durable.

Le bois comme énergie

En 2010, La consommation de bois énergie s'élevait à près de 6 % des besoins français en énergie. Elle concerne très fortement le secteur domestique (78 %), puis le secteur industriel (18 %) et enfin les secteurs collectif et tertiaire où elle est en plein développement (Hubert, 2012).

Ces chiffres sont mis en avant dans les politiques actuelles de réduction des émissions de CO₂, car la ressource bois, contrairement au gaz, charbon ou pétrole, est renouvelable à l'échelle de quelques générations humaines (le terme généralement utilisé dans les calculs carbone est 50 ans). Le carbone contenu dans le bois énergie en amont de sa combustion est ainsi retranché des émissions dues à la préparation des énergies et à sa combustion (tableau 8).

Faut-il pour autant faire feu de tout bois ? Pour faire bon usage du bois-énergie, il semble important de garder en mémoire que :

- La meilleure réduction des émissions reste **l'économie d'énergie** : en améliorant l'efficacité énergétique des logements à chauffer et en imposant des normes d'isolation optimales, la consommation de bois énergie serait fortement réduite.

- Le bois est actuellement un des **combustibles qui émet le plus de GES**, se situant au même niveau que le charbon (tableau 8). Le carbone libéré lors de sa combustion est certes stocké au cours de la croissance de l'arbre. Mais pour que cette source d'énergie soit réellement durable (neutre vis-à-vis du carbone), il faut que l'ensemble du carbone libéré par combustion du bois énergie corresponde à l'ensemble du carbone fixé par la croissance des arbres, et ce durant la même période et à l'échelle mondiale. Il est également capital de continuer à améliorer l'efficacité énergétique de la ressource bois.

- Le bois énergie est une énergie renouvelable intéressante pour une **utilisation locale insérée dans un territoire**. Ce qui n'est pas le cas des grandes centrales consommatrices de plusieurs centaines de milliers de tonnes de bois (notamment les projets de la commission de régulation de l'énergie -CRE-). Le développement

de petites chaufferies s’approvisionnant en bois local, lorsque la ressource est disponible, est un bien meilleur gain tant social, qu’économique ou écologique.

- L’utilisation du bois comme source d’énergie reste **une façon de valoriser les bois, économiquement parlant, très médiocre**. Que ce soit en termes de prix au m³ ou de création d’emplois, on est très loin de que l’on peut atteindre avec du bois d’œuvre ou même du bois d’industrie.
- Une gestion orientée vers la production de bois énergie est **préjudiciable aux enjeux écologiques et paysagers** : en dehors des bois d’éclaircies, c’est la coupe rase qui prédomine. Nous avons développé en 2^{ème} partie les impacts sur le stockage de carbone, ce ne sont pas les seuls (érosion, disparition des espèces liées aux vieux arbres, appauvrissement des sols, etc.).

Tableau 8. Émissions de GES du bois et d’autres combustibles (d’après Leturcq, 2011 ; Guinard, 2012)

Combustible	Quantité de GES émise pour la production d’un mégajoule (tC/Mj)				
	Combustion	Autres émissions (transport, extraction, etc.)	Captation en forêt	Émissions totales Brutes	Nettes
Gaz naturel	15	3		18	18
Fioul lourd	21	3		25	25
Fioul domestique	21	4		25	25
Plaquettes forestières (40 % humidité)	26	1	26	29	1
Charbon	26	2		29	29
Écorces, sciure, broyat (30 % humidité)	28	0,3	28	29	0,3

L’économie de carbone par la substitution du bois comme énergie est donc à considérer de manière prudente, d’autant plus que les résultats des études concernant le gain de carbone de la substitution des énergies fossiles par le bois sont assez différents (tableau 9), l’utilisation d’1 m³ de bois énergie à la place d’énergies fossiles permettrait d’économiser 163 kgC d’après Taverna & al. (2007).

Mais quels volumes doit-on considérer ? Si un bois peut être valorisé en produit à plus haute valeur ajoutée, et donc à plus longue durée de vie, doit-il être considéré comme une énergie de substitution ? De plus, le volume autoconsommé n’est qu’une estimation. Si l’on fait le choix de considérer l’ensemble de la consommation en bois énergie, selon les paramètres préalablement fixés, on atteint une économie de 5 MtC/an (tableau 9).

Tableau 9. Quantité de carbone économisée par la substitution du bois comme énergie

Économie de carbone pour 1 m³ de bois consommé, 163 kgC (Taverna & al., 2007). Le coefficient de conversion utilisé est celui de Dupouey & al. (2000) soit 0,37 pour toutes essences confondues.

	Volume	Carbone	Substitution
	Mm ³	tC	MtC
Autoconsommation	21,0	7,8	3,4
Exploitation dédiée	5,6	2,1	0,9
Pertes de la filière bois d’œuvre	4,5	1,7	0,7
Total	31,1	11,5	5

Avec un volume de bois dédié à l’énergie de 31,1 Mm³ est une économie de 5 MtC, le taux de rentabilité de la substitution par le bois à d’autres énergies est 16 %, nettement inférieur à celui de la substitution par le bois d’autres matériaux (22 %).

La consommation totale de bois énergie en France atteint 31 Mm³ par an, dont seulement 5,6 Mm³ sont réellement pris en compte par les statistiques nationales. Il est important qu'à l'avenir ces volumes soient mieux connus afin de rendre plus fiables les évaluations d'économie de carbone.

En conclusion, les effets de la substitution restent faibles en termes de carbone, si les stocks des produits bois sont comparés à ceux des écosystèmes forestiers. A l'échelle nationale, en prenant en compte les bois importés, les produits bois représentaient entre 200 MtCO₂ en 2008 (Chenost et Rubio, 2008) et 313 MtCO₂ en 2005 (FCBA, 2008) soit 54 à 85 MtC. Il n'existe toutefois actuellement pas de réelle évaluation des stocks de carbone sous forme de produits bois.

Hierarchie des usages du bois et additionnalité réelle des réductions des émissions

La substitution par le bois d'autres matériaux ou d'autres énergies d'origine fossiles est un moyen intéressant de valoriser une ressource renouvelable sous réserve qu'elle soit bien gérée. Pour rendre compte des bienfaits de la substitution, réfléchir sur le cycle de vie (de la production aux usages, réutilisations et recyclage) pour replacer les choix dans une vision globale, incluant l'écosystème forestier et les usages, est nécessaire.

Les émissions de carbone fossile évitées par la substitution par le bois ne devraient être comptabilisées que s'il y a une réelle substitution ou réduction des émissions correspondantes. Il faut donc que la part des émissions liées aux produits bois consommés augmente, et dans le même temps que celle des produits d'origine fossile diminue. Par exemple, le bois-énergie (rendement faible) ne doit pas être utilisé pour répondre à une hausse des consommations (notamment d'électricité). Il n'y aurait dans ce cas aucune diminution des émissions de CO₂.

De plus, la substitution ne doit pas se faire au détriment de la valeur ajoutée des produits. Une hiérarchie claire et stricte des usages doit être émise par la politique forestière française (Neyroumande et Vallauri, 2011). Si l'on raisonne tant d'un point de vue écologique qu'économique, les usages du bois devraient être promus selon la hiérarchie suivante : bois d'œuvre > bois d'industrie (panneaux, papier) > bois énergie. Cette hiérarchisation a de fortes répercussions sur les choix sylvicoles (y compris la biodiversité conservée), la politique industrielle et les incitations de l'État. La promouvoir implique un bilan carbone très supérieur à une autre politique mettant en avant, par exemple, le tout énergie. Le recyclage est important car à production égale cela économise de la matière, du CO₂, de l'énergie (voir l'exemple du papier).

Rhône-Alpes en exemple

Des sylvicultures rhônalpines tournées vers le bois d'œuvre

La filière forêt-bois de Rhône-Alpes comptait, en 2012, 14 604 entreprises rassemblant 39 825 salariés. Ces entreprises se répartissent à 50 % dans la construction bois, 21 % en forêt, 10 % dans l'ameublement, 10 % dans la distribution (Bret, 2014).

La récolte rhônalpine s'élevait à environ 2,5 Mm³ en 2009 (AGRESTE, 2015). 1,8 Mm³ ont été utilisés dans la filière Bois d'œuvre (dont 0,9 Mm³ de chutes), 0,26 Mm³ en bois d'industrie (hors chutes des scieries), 0,45 Mm³ en bois énergie (il est à signaler que l'autoconsommation n'est pas comptabilisée ici, en dépit de son importance). La production rhônalpine de bois est très ciblée sur le bois d'œuvre puisque 72 % de la récolte sont utilisés dans cette filière (figure 19). La plupart de la récolte est transformée en Rhône-Alpes puisque seuls 33 000 m³ sont exportés (notamment ¼ du sciage brut de feuillus).

Afin de maintenir, voire de développer cette production de bois d'œuvre, plusieurs préconisations peuvent être formulées. Il est tout d'abord nécessaire de rassembler les propriétaires, par exemple au sein d'associations syndicales libres, ou de groupements forestiers. On recense 462 milliers de propriétaires dans la région, pour une surface moyenne de propriété de 2,5 ha. En 2011, seuls 9 % de la superficie de forêt privée bénéficiait d'un plan simple de gestion.

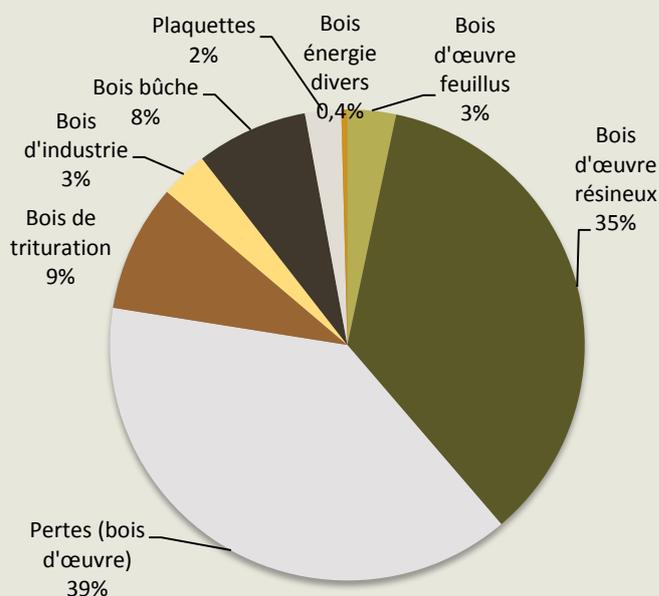


Figure 18. Récolte en forêt de Rhône-Alpes par catégorie de produits (d'après Agreste, 2011)

Le morcellement de la propriété privée, au niveau régional comme au niveau national, est un problème de taille pour la gestion, particulièrement si l'on souhaite produire du bois d'œuvre de qualité.

Le rassemblement des propriétaires en grandes unités de gestion permettrait de mener une gestion plus durable, tournée vers la production d'un bois d'œuvre de qualité, présentant des atouts indéniables sur les plans :

- économique (forte valeur ajoutée des produits bois transformés),
- social (maintien et création d'emplois locaux dans les filières de transformation),
- écologique (gestion impliquant des cycles sylvicoles longs favorables au développement d'une riche biodiversité),
- et du carbone (maximisation des stocks en forêt et dans des produits bois à durée de vie longue).

Actuellement en Rhône-Alpes, seuls 52 % de l'accroissement biologique sont récoltés (contre 65 % au niveau national).

Par ailleurs, le développement des logiques de contrats d'approvisionnement est souhaitable. Cela permet d'optimiser le tri des produits, par qualité, en vendant des bois façonnés plutôt que des bois sur pied.

Enfin, l'amélioration de la traçabilité des bois commercialisés, comme les labels Bois des Alpes² ou Bois de Chartreuse², développés en Rhône-Alpes, est un atout commercial de taille pour la production d'un bois d'œuvre de qualité à haute valeur ajoutée.

² Plus d'informations : www.boisdesalpes.net / www.bois-de-chartreuse.fr

Recommandations pour une gestion durable

Concilier le stockage de carbone et les autres enjeux des forêts

Il a été montré tout au long de ce rapport que le meilleur moyen d'optimiser le stockage du carbone par les écosystèmes forestiers est la non intervention. Toutefois, si cette option permet de répondre aux objectifs de conservation de la biodiversité, de restauration de la naturalité, elle ne permet pas de répondre aux multiples autres objectifs assignés aux écosystèmes forestiers. Au premier rang desquels la production de bois, nécessaire à une économie nationale créatrice de richesses et d'emplois.

Celle-ci est structurée par des besoins et des industries, sous la forme de filières : bois matériau, bois énergie, bois d'industrie, papier. Pour être viable, elle doit être une source de revenus pour les propriétaires forestiers, les industries et les artisans d'une filière déficitaire en France.

Si l'on réfléchit collectivement l'orientation économique d'une politique forestière équilibrée, l'objectif à atteindre pourrait être formulé par :

- répondre à la demande des usagers et consommateurs (en limitant autant que possible les importations de bois étranger),
- d'optimiser à la fois les gains des propriétaires, la valeur ajoutée pour l'industrie transformatrice, et l'emploi local.

Par ailleurs, il ne faut pas non plus perdre de vue que bien d'autres valeurs et services sont fournis par la forêt, parfois générateurs de revenus directs : produits forestiers non ligneux (champignons, liège), chasse, conservation de la biodiversité liée aux vieux arbres (en zone Natura 2000) ; d'autres sont dits non marchands ou s'imposent au propriétaire (protection des zones de captage d'eau, biodiversité). Le stockage de carbone est un service apparu récemment (année 1990) et qui pourrait devenir rémunérateur (voir le marché des crédits carbone volontaires ou le projet Sylv'actes en région Rhône-Alpes, cf. partie 2). D'autres enjeux sociaux et écologiques ne génèrent pas de revenus directs mais sont néanmoins à prendre en compte. La gestion forestière se doit d'intégrer tous ces enjeux et d'y répondre du mieux possible.

Conserver une trame de vieux bois en libre évolution, une chance pour la France

La France est climatiquement très variée : les changements climatiques en cours auront des répercussions fortes (bien que progressives et tamponnées par certains facteurs, historiques notamment). Pour bien s'adapter et se réorganiser, les forêts et leur biodiversité, mais aussi l'économie qu'elles génèrent, doivent compter sur une continuité dans l'espace et le temps des structures forestières.

Ainsi, même si la matrice forestière exploitée est bien gérée selon les principes énoncés ci-dessous, il n'en demeure pas moins non seulement utile mais indispensable de conserver une trame de vieux bois, que ce soit des arbres isolés (arbres « bio », arbres à microhabitats, arbres morts, etc.), des îlots de sénescence (laissés en évolution naturelle à la différence des îlots de vieillissement coupés plus tard que l'âge/diamètre d'exploitabilité), des réserves intégrales.

Ces différents réservoirs de biodiversité sont nécessaires à la survie de la biodiversité aujourd'hui ; ils sont indispensables pour l'adaptation des forêts aux changements climatiques (augmentation de la résilience dans les territoires) ; ils sont autant de stocks de carbone conservés ou restaurés en forêt et dans leur sol.

Les forêts aujourd'hui identifiées comme à caractère naturel, à haute valeur pour la biodiversité, anciennes (sol peu perturbé par l'agriculture) ou bénéficiant d'un régime durable de libre évolution (par choix du propriétaire ou inaccessibles à l'exploitation moderne) sont à conserver dans cette trame en priorité.

Pour être efficaces, ces éléments de la trame de vieux bois en libre évolution doivent être connectés d'un point de vue écologique (notion de corridor). Ils servent de modèles pour analyser la dynamique naturelle des écosystèmes forestiers, et inspirer une gestion proche de la nature, répondant aux multiples enjeux dont la forêt fait l'objet.

Face à l'exploitation (nécessaire à cause de la qualité du matériau bois), et à la gestion (indispensable pour orienter la dynamique vers une exploitation durable), donc à des émissions de CO₂, on peut imaginer des compensations. Le projet FRENE de la région Rhône-Alpes, complémentaire du projet Sylv'actes va tout à fait dans ce sens, en promouvant la libre évolution d'un minimum de 10 % des forêts du territoire rhônalpin (voir partie 2).

Faire les bons choix sylvicoles

Des sylvicultures visant la production de bois d'œuvre de qualité, au mieux du potentiel de la station, permettent de remplir une grande partie des objectifs énoncés ci-dessus.

Au sein de celles-ci, la futaie irrégulière et continue est pour cela le traitement économiquement le plus optimal pour le propriétaire forestier. Il permet d'optimiser les revenus en produisant un bois de qualité, et de minimiser les coûts d'entretien ainsi que les risques, qu'ils soient liés aux aléas climatiques ou aux aléas du marché.

Le traitement en futaie irrégulière permet d'obtenir des peuplements plus stables et plus résilients³. Il ne faut cependant pas perdre de vue, comme le rappellent Neyroumande et Vallauri (2011) que « *vouloir chercher la stabilité absolue est un leurre. Un écosystème est en dynamique permanente. L'objectif sylvicole de faire des arbres plus petits, plus vite, pour passer entre deux tempêtes, est une impasse écologique comme économique. Pourtant cela a été recommandé [(Ballu, 2008 ; Puech 2009)] et largement repris. Ce pari a déjà été mis en défaut lors des tempêtes de 2009, dans les forêts des Landes de Gascogne, qui avaient été déjà durement touchées en 1999* ».

On peut cependant citer un certain nombre de mesures permettant d'améliorer à la fois la productivité, la stabilité et la résilience des peuplements gérés (d'après Bruciamacchie et Tomasini, 2008) :

- **Éviter autant que possible les coupes rases.** On a vu les effets néfastes d'une absence de couvert végétal sur le sol. Le couvert continu diminue l'évapotranspiration, atténue les extrêmes de température du sol et des basses couches de la végétation, ralentit la minéralisation de l'humus et la libération du carbone dans l'atmosphère.
- **Préférer les interventions prudentes et continues.** Elles sont beaucoup plus efficaces pour stabiliser les peuplements. Elles permettent d'obtenir des arbres plus trapus, qui, tels les arbres de lisière, sont plus stables face aux tempêtes. Elles sont surtout la traduction pratique d'une nécessaire humilité devant la complexité du fonctionnement des forêts, et un facteur clé d'économie (en forêt, un bilan positif s'obtient surtout en étant économe en dépenses).
- **Allonger les durées des cycles sylvicoles. Pour avoir un réel effet sur le stock de carbone des forêts gérées, il faut d'abord ne pas couper les arbres trop tôt. Ceci est valable quelle que soit la sylviculture.** La séquestration du carbone dans la biomasse est optimisée, et le bois récolté d'un diamètre intéressant pour la production de bois d'œuvre (figure 20). Le maintien sur pied d'arbre de gros diamètre favorise tant la biodiversité que la stabilité du peuplement.

³ Stabilité : capacité d'un écosystème à résister à des perturbations extérieures (biotiques ou abiotiques) et de continuer son fonctionnement normal.

Élasticité (flexibilité, résilience) : capacité d'un écosystème à se rétablir après une grande perturbation et à retrouver rapidement son fonctionnement normal (d'après Otto, 1998, in De Turckheim et Bruciamacchie, 2005).

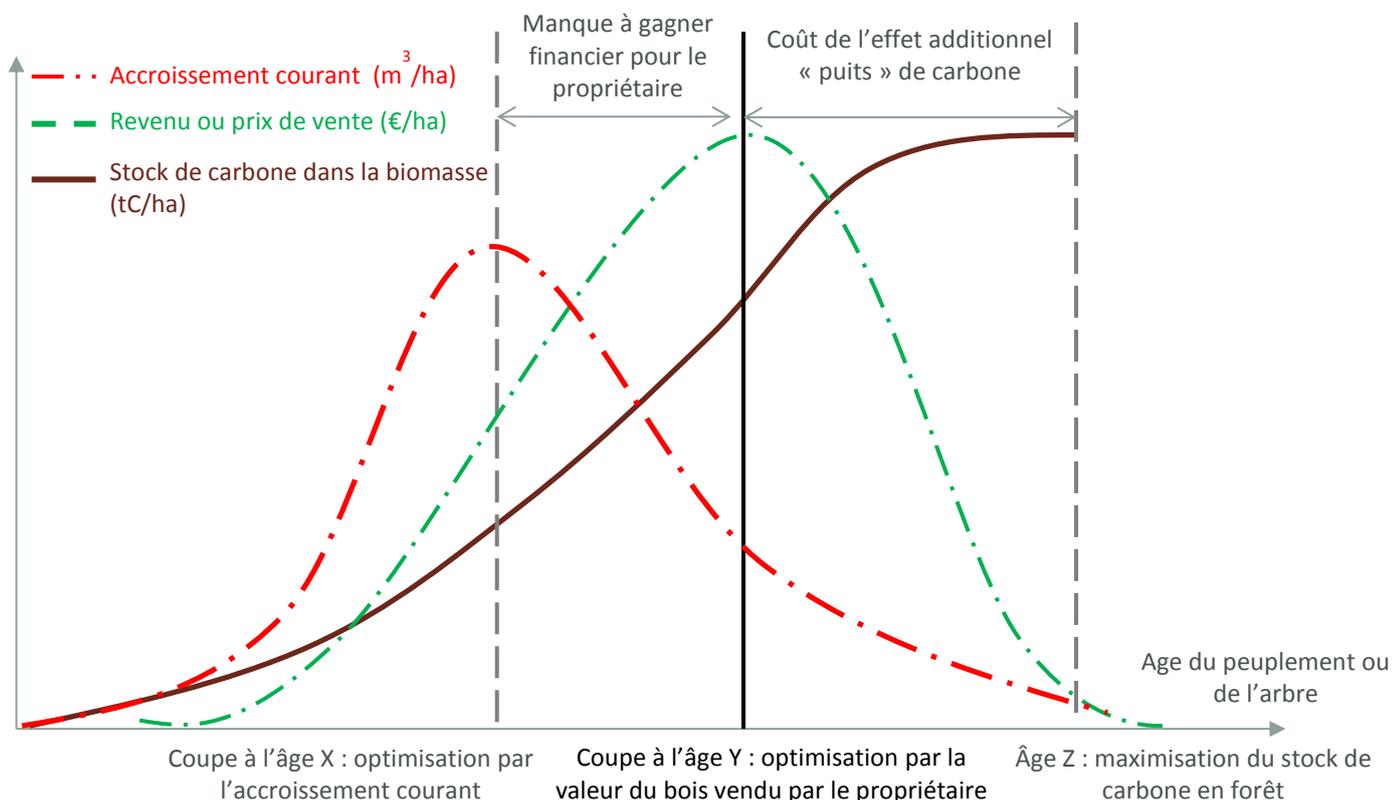


Figure 19. Schématisation de trois logiques possibles pour décider de l'âge d'exploitation en forêt

Évolution en fonction de l'âge de l'arbre ou du peuplement de trois variables. L'ordonnée est différente pour chaque courbe. Si l'on récolte les bois à la coupe Y, on optimise le gain pour le propriétaire puisque le prix au m^3 est maximal. L'âge auquel l'arbre a une vitesse d'accroissement maximale (coupe X) ne permet pas d'optimiser le prix au m^3 , et la biomasse est faible, ce qui limite le stock de carbone. En revanche, si l'on dépasse la coupe Y, le risque de perdre le capital sur pied est plus important. La biomasse continue d'augmenter, maximisant le stock de carbone sur pied (coupe Z), mais les bois ne sont que difficilement commercialisables au-delà d'un certain diamètre. La coupe Y est donc un bon compromis, permettant à la fois de conserver un stock de carbone sur pied intéressant, et de valoriser la récolte sous forme de bois d'œuvre.

- **Favoriser le mélange des essences** (feuillus/résineux). Il améliore aussi la stabilité des peuplements grâce à une structure verticale complexe, qui permet en outre une prospection racinaire à différents niveaux, utilisant au mieux les réserves en eau du sol.
- **Maintenir un volume sur pied plutôt modéré.** La consommation d'eau est alors réduite et une réserve d'eau plus importante est disponible pour chaque individu. La capacité d'adaptation de certaines espèces est améliorée, comme pour le hêtre, qui réapparaît en région méditerranéenne, alors qu'il en avait été éliminé par les coupes rases, le pâturage, l'écobuage.
- **Laisser les souches et rémanents sur place.** On ne le répètera jamais assez, les souches et les rémanents (diamètre < 7 cm) sont, avec la litière, deux sources de carbone du sol. Ils contiennent par ailleurs une quantité considérable d'éléments minéraux (tout particulièrement le feuillage). Leur exportation joue un rôle clé sur la fertilité des sols, à la fois sur sa teneur en nutriments, notamment la disponibilité en azote, et son activité biologique. Et bien entendu, la biomasse aérienne stockera d'autant plus de carbone que le sol est fertile. Cet effet est encore amplifié si l'on se trouve sur des stations pauvres. Ce sont des engrais gratuitement produits par la forêt, cela n'a pas de sens de les exporter pour ensuite être contraint à compenser par fertilisation quelques décennies plus tard (avec des engrais d'origine fossile !).

- **Conserver du bois mort en forêt.** La décomposition de bois mort par des champignons lignicoles dégage de l'eau, récupérable en période sèche, par les racelles des arbres. Le bois mort, particulièrement celui de gros diamètre, est un habitat clé d'une biodiversité essentielle au bon fonctionnement de l'écosystème. C'est aussi un stock de carbone utile à conserver dont la dégradation enrichit progressivement les sols.
- **Augmenter la diversité génétique.** Au sein même des essences, elle permet l'émergence d'individus plus résistants que d'autres, de même que la diversité spécifique permet de prévenir l'effondrement des peuplements dans le cas de l'élimination de l'une ou l'autre essence. Deux facteurs clé de la résilience des essences et des peuplements aux changements climatiques.
- **Étendre la réserve de recrues.** Ceux-ci, qu'ils soient des arbres producteurs, ou des pionniers d'essences secondaires, permettent la reconstitution très rapide des écosystèmes après un éventuel sinistre. À nouveau, la forêt produit les éléments de sa résilience, de façon gratuite pour le sylviculteur averti.

Ces préconisations sont à la base des sylvicultures promues par l'association Prosilva⁴.

Des forêts riches stockent plus de carbone que des monocultures artificielles, et les produits qui en sont obtenus après transformation, captent plus durablement, sur le long terme, le carbone (Bruciamachie et Tomasini, 2008). Elles sont par ailleurs une source de biodiversité des plus intéressantes : une forêt diversifiée tant du point de vue des essences que des classes d'âges ou des classes de diamètres recèle une multitude d'habitats pour une faune et une flore variée. La diversité des microhabitats peut facilement être maximisée en maintenant sur pieds quelques arbres de qualité moindre, propices à la formation de cavités. De telles forêts présentent également un attrait paysager indéniable pour les promeneurs.

Fonder sur les forêts une économie durable à faible empreinte carbone

Le déficit de la balance commerciale de la filière bois s'élevait en 2012 à 3 à 7 milliards d'€ selon que l'on considère ou non la filière Ameublement. En tout état de cause, on peut constater que les soldes commerciaux sont particulièrement négatifs pour les produits à forte valeur ajoutée (ameublement, sciages, charpente et menuiseries, autres produits bois). Seuls l'emballage bois et la commercialisation de bois brut présentent une balance commerciale positive.

Pour parvenir à rééquilibrer la balance commerciale de la filière bois française, il semble donc préférable de transformer mieux, c'est à dire de créer de la valeur ajoutée sur la seconde transformation et au-delà, plutôt que d'exploiter plus.

Il est capital que la France reste un pays de valorisation des bois de qualité qui sont exploités dans ses forêts. L'importation massive de matière première lointaine (comme les cargos de pellets canadiens ou brésiliens pour alimenter les grosses centrales productrices de chaleur et/ou d'électricité) ou à l'inverse l'exportation de bois de qualité vers des pays à main d'œuvre peu chère (comme les grumes de hêtre vers la Chine) ne sont pas des perspectives durables si elles se multiplient, tout autant pour des raisons écologiques, sociales qu'économiques. Une telle politique présente un bilan carbone très critiquable.

En conclusion, la forêt est le siège de nombreux enjeux et usages. Le carbone en fait partie, mais il faut également considérer les besoins en bois de nos sociétés, tout autant que les autres biens et services des écosystèmes forestiers : usages récréatifs, aspects paysagers, produits forestiers non ligneux, chasse etc. La forêt est avant tout un écosystème où l'homme reste une espèce au sein d'une vaste biodiversité. Aux forestiers de trouver le juste équilibre...

⁴ Plus d'informations : www.prosilva.fr

Bibliographie

- Amaranthus M.P., 1992, Mycorrhizas, forest disturbance and regeneration in the Pacific Northwestern United States, in *Mycorrhizas in Ecosystems*, C.A.B international, University Press, Cambridge, 202-207.
- André J., 1997, La phase hétérotrophe du cycle sylvigénétique, *Dossiers de l'environnement de l'Inra. 15, Spécial forêts*, pp. 87-99.
- Andreux F., 1996, Humus in world Soil, in *Humic substances in terrestrial ecosystems. A. Piccolo Ed. Elsevier*, Amsterdam, p. 45-100.
- Bardy S., 2014, De l'intelligence collaborative à l'économie circulaire. France, terre d'avenir de l'industrie papetière, *Rapport ministériel*, 227 p.
- Benbrahim M., Ulrich E., Brêthes A., 2006, Stocks de carbone organiques dans les sols forestiers des 102 peuplements du réseau RENECOFOR, *Actes du colloque Les matières organiques en France - État de l'art et perspectives*, pp. 1-7.
- Brändli U.-B. (Réd.) 2010, Inventaire forestier national suisse. Résultats du troisième inventaire 2004–2006. *Birmensdorf, Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage WSL. Berne, Office fédéral de l'environnement, OFEV*. 312 p.
- Bret F., 2014, Contrat d'Études Prospectives Filière forêt-bois de Rhône-Alpes, *Fibra*, 17 p.
- Bruciamacchie M., Tomasini J., 2008, L'augmentation de la récolte de bois en France et la gestion des risques induits par les changements climatiques, *La lettre de Prosilva France, n°44*, p. 8-10.
- Buchholz T., Friedland A. J., Hornig C. E., Keeton W. S., Zanchi G., Nunery J. S., 2014, Mineral soil carbon fluxes in forests and implications for carbon balance assessments, *GCB Bioenergy*, vol. 6, n° 4, pp. 305–311.
- Chenost C., Rubio M., 2008, Forêt, bois énergie, bois matériau et carbone, *Rendez-vous techniques*, vol. 20, pp. 41–43.
- Ciais P., Schelhaas M. J., Zaehle S., Piao S., Cescatti A., Liski J., Luysaert S., Le Maire G., Schulze E. D., Bouriaud O., Freibauer A., Valentini R., Nabuurs G. J., 2008, Carbon accumulation in European forests, *Nature Geoscience*, vol. 1, pp. 425–429.
- Citeau L., Bispo A., Bardy M., King D., coord. 2008, Gestion durable des sols, *Collection Savoir Faire, Editions Quae*, 320 p.
- Colin A., Derrière N., 2005, La forêt française : un puits de carbone ?, *L'IF*, vol. 7, 8 p.
- Collectif APN, 2015, Carbone et Forêts (Réflexions et propositions sur la diversité des filières carbonées). Forêts Sauvages, FRAPNA, LPO-CoRA. Rédaction Philippe Lebreton, 58 p.
- Dambrine E., Dupouey J.L., Laüt L., Humbert A., Thinon M., Beaufils T., Richard H. 2007, Present forest biodiversity patterns in France related to former Roman agriculture, *Ecology* 88 (6) : 1430-1439.
- De Turckheim B., Bruciamacchie M., 2005, La futaie irrégulière. Théorie et pratique de la sylviculture irrégulière, continue et proche de la nature, *Édition Edisud*, 282 p.
- Deheza M., Bellassen V., 2010, Valorisation carbone de la filière forêt-bois en France, *Etude climat*, vol. 20, pp. 1–52.
- Deroubaix G., Vial E., Cornillier C., 2012, Cycle de vie des produits à base de bois et séquestration du carbone, *Innovations agronomiques*, vol. 18, pp. 31–37.
- Dodelin B., Eynard-Machet R., Athanaze P., André J., coordinateurs, 2008, Les rémanents en foresterie et agriculture, *Editions Tec & Doc - Lavoisier*, 386 p.
- Dommergues Y., Mangenot F., 1970, Ecologie microbienne du sol, *Masson Ed.*, 795 p.

- Drénou C. (Coordinateur), 2006, Les racines. Face cachée des arbres, *IDF*, 335 p.
- 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, *Revue Forestière Française*, vol. LII, Numéro spécial 2000, pp. 139–154.
- Dupouey J.-L., Pignard G., 2001, Quelques problèmes posés par l'évaluation des stocks et flux de carbone forestiers au niveau national, *Revue forestière française*, vol. LIII, n° 3–4, pp. 294–300.
- Dupouey J.-L., Dambrine E., Moares C., Lafitte J.D. 2002, Irreversible impact of past land use on forest biodiversity, *Ecology* 83: 2978-2984.
- FCBA, 2008, Carbone Forêt-bois : des faits et des chiffres, *Rapport FCBA*, 15 p.
- FCBA, 2014, Mémento 2014, *FCBA*, 59 p.
- Desbourdes L., Febvre V., Javaux B., Thauvin G., 2008, Effets des changements climatiques sur l'évolution des stocks de carbone organique des sols forestiers. *Rapport de projet FIF*, 8 p.
- Fontelle J.P., Chang J.P., Vincent J., 2014, Organisation et méthodes des inventaires nationaux des émissions atmosphériques en France, 11^{ème} édition, *OMINEA, CITEPA*, 1222 p.
- Foster B.C., Robards T.A., Keeton W.S., 2010, Carbon dynamics associated with even-aged forest management, *Climate action reserve report*, 62 p.
- Garnier P., Fernandez O., Cambier C., Chenu C., Recous S., 2006, Modélisation du contact sol-matière organique et de son influence sur la décomposition, *Actes du colloque Les matières organiques en France - État de l'art et perspectives*, pp. II 1-1.
- Gershenson A., Barsimantov J., Ecoshift consulting, 2011, Accounting for carbon in soils, *Climate action reserve white paper*, 46 p.
- Guinard L., 2012, De l'aporétique controversée du bois énergie neutre en carbone !, *Pôle économie énergie prospective, FCBA*, 7 p.
- Hubert M., 2012, Le marché du bois en France. Situation actuelle et perspectives à court terme, *Comité du bois, Commission économique pour l'Europe des Nations Unies, 70^{ème} session*, 24 p.
- IFN, 2010, Stock de carbone de la biomasse ligneuse et des sols des forêts et autres terres boisées, *Indicateurs de gestion durable des forêts françaises métropolitaines*, pp. 37-41.
- Keith H., Lindenmayer D., Mackey B., Blair D., Carter L., McBurney L., Okada S., Konishi-Nagano T., 2014, Managing temperate forests for carbon storage : impacts of logging versus forest protection on carbon stocks, *Ecosphere*, vol. 5(6), n° 75, 34 p.
- Kuiters L., 1987, Phenolic acids and plant growth in forests ecosystems, *Free University Press, Amsterdam*, 150 p.
- Larrieu L., Gonin P., 2008, L'indice de biodiversité potentielle (IBP) : une méthode simple et rapide pour évaluer la biodiversité potentielle des peuplements forestiers, *Revue Forestière Française*, vol LX, n°6, p. 727-748.
- Lavelle P., Spain A. V., 2001, Soil Ecology, *Kluwer Acad. Publishers*. 654 p.
- Lecocq F., Seynave I., Couture S., 2008, Gestion forestière et carbone, *Rapport final convention particulière AgroParisTech - ONF n°2, Nancy-AgroParisTech*, 128 p.
- Lemée G., 1987, Dynamique de fermeture par régénération et évolution morphométrique du hêtre dans les vides d'une forêt non exploitée (réserves biologiques de la forêt de Fontainebleau), *Société d'écologie Ed . Paris, Bulletin d'écologie*, vol. 18, n°1, pp. 1-11.
- Leturcq P., 2011, La neutralité carbone du bois énergie : un concept trompeur ?, *Revue Forestière Française*, vol. LXIII, n° 6, pp. 723–734.

- Liski J., Perruchoud D., Karjalainen T., 2002, Increasing carbon stocks in the forest soils of western Europe, *Forest Ecology and Management*, vol. 169, pp. 159–175.
- Loustau D., 2001, 7/01-Projet CARBOFOR : Séquestration de carbone dans les grands écosystèmes forestiers en France. Quantification, spatialisation et impacts de différents scénarios climatiques et sylvicoles, *Résumé du rapport final INRA*, 5 p.
- Loustau D., 2004, Rapport final du projet Carbofor, *INRA Bordeaux*, 138 p.
- Luyssaert S., Ciais P., Piao S., Schulze E. D., Jung M., Zaehle S., Schelhaas M. J., Reichstein M., Churkina G., Papale D., Abril G., Beer C., Grace J., Loustau D., Matteucci G., Magnani F., Nabuurs G. J., Verbeeck H., Sulkava M., Van der Werf G. R., Janssens I. A., 2010, The European carbon balance. Part 3 : forests, *Global Change Biology*, vol. 16, n° 5, pp. 1429–1450.
- Luyssaert S., Schulze E. D., Börner A., Knohl A., Hessenmöller D., Law B. E., Ciais P., Grace J., 2008, Old-growth forests as global carbon sinks., *Nature*, vol. 455, n° 7210, pp. 213–5.
- Madignier M. L., Benoit G., Roy C., 2015, Les contributions possibles de l'agriculture et de la forêt à la lutte contre le changement climatique, *CGAAER*, 83 p.
- Magrum M., Lerat J.-F., 2011, Mobiliser la forêt, pp. 3-5, in Figuet R., Bardon E., Bour-Poitrinal E., Dereix C., Leblanc-Cuvillier A., 2011, Biomasse, énergie, climat : de la photosynthèse à la bio économie. Tome 2 : L'énergie des bois, *Cahier thématique*, CGAAER, vol. XIV, Tome 2, 32 p.
- MEDDE, 2013, Les chiffres clés du changement climatique, *MEDDE*, 44 p.
- Moukoui J., Munier-Lamy C., Mallouhi N., Kulhankova A., Beguiristain T., Berthelin J., Ranger J., 2006, Dynamique de dégradation de la cellulose et du bois sous différents couverts forestiers. *Actes du colloque Les matières organiques en France - État de l'art et perspectives*, pp. II-18.
- Neyroumande E., Vallauri D., 2011, Regards sur la politique des forêts en France, *WWF France*, Paris, 42 p.
- Nunery J. S., Keeton W. S., 2010, Forest carbon storage in the northeastern United States: Net effects of harvesting frequency, post-harvest retention, and wood products, *Forest Ecology and Management*, vol. 259, n° 8, pp. 1363–1375..
- Nys C., Arrouays D., Dupouey J.L., Forgeard F., Gelhaye L., Hossann C., Huet S., Lebreton M., Le Tacon F., Renaud J.P., Richter C., 2002, Effets de la sylviculture sur le stockage de carbone dans les sols forestiers. Données pour une validation des paramètres du modèle d'évolution des stocks de carbone. *GICC, Toulouse*.
- Paquet P., Deroubaix G., 2003, Extension de l'éligibilité de la séquestration forestière du carbone à l'ensemble des stocks de la filière bois. Coordination CTBA. *Rapport à l'ADEME pour le Programme GICC*, 148p.
- Pesson, P., 1974, Écologie forestière : la forêt, son climat, son sol, ses arbres, sa faune. *Éditions Gauthier-Villars, Paris*, 382 p.
- Picard O., 2006, Forêt = puits de carbone ?, *Forêt-entreprise*, vol. 168, pp. 50–51.
- Rossi M., Vallauri D., 2013, Evaluer la naturalité, Guide pratique version 1.2, *WWF France*, Marseille, 154 p.
- Rossi M., Bardin, P., Cateau E., Vallauri D., 2013, Forêts anciennes de Méditerranée et montagnes limitrophes, Références pour la naturalité régionale, *WWF France*, Marseille, 144 p.
- Saugier B., 2009, Bilan carboné des écosystèmes forestiers, *Revue Forestière Française*, vol. LI, no. 2, p. 239.
- Seidl R., Rammer W., Lasch P., Bader F., Lexer M. J., 2008, Does conversion of even-aged, secondary coniferous forests affect carbon sequestration ? A simulation study under changing environmental conditions, *Silva Fennica*, vol.42, pp. 369–386.
- Stephenson N. L., Das A. J., Condit R., Russo S. E., Baker P. J., Beckman N. G., Coomes D. A., Lines E. R., Morris W. K., Rüger N., Alvarez E., Blundo C., Bunyavejchewin S., Chuyong G., Davies S. J., Duque A., Ewango C. N., Flores O., Franklin J. F., Grau H. R., Hao Z., Harmon M. E., Hubbell S. P., Kenfack D., Lin Y., Makana J.-R., Malizia A., Malizia L. R., Pabst R. J., Pongpattananurak N., Su S.-H., Sun I.-F., Tan S., Thomas D., Van Mantgem P. J.,

Wang X., Wiser S. K., Zavala M. A., 2014, Rate of tree carbon accumulation increases continuously with tree size., *Nature*, vol. 507, n° 7490, pp.90–3.

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 n°0739. Federal office for the Environment, Bern*, 102 p.

Vallet P., 2005, Impact de différentes stratégies sylvicoles sur la fonction 'puits de carbone' des peuplements forestiers. Modélisation et simulation à l'échelle de la parcelle, *Thèse, ENGREF*, 190 p.

Vallauri D., André, J., Dodelin B., Eynard-Machet R., Rambaud D. (coord.) 2005, Bois mort et à cavités, une clé pour des forêts vivantes. *Lavoisier, Tec & Doc, Paris*, 404 p.

Vallauri D., Grel A., Granier E., Dupouey J.L. 2012, Les forêts de Cassini. Analyse quantitative et comparaison avec les forêts actuelles. *Rapport WWF/INRA, Marseille*, 64 p. + CD.

Liste des abréviations

CGAAER : Conseil général de l'alimentation, de l'agriculture et des espaces ruraux

FER : facteur d'expansion des racines

FEB : facteur d'expansion des branches

GES : gaz à effet de serre

GtC / MtC / Mm³ : gigatonne de carbone (10⁹) / millions de tonnes de carbone (10⁶) / millions de m³

IFN / IGN : Inventaire forestier national, fusionné avec l'Institut géographique national

NEP : production primaire nette de l'écosystème

NPP : production primaire nette

Rh : respiration hétérotrophe

Liste des tableaux

Tableau 1. Répartition du carbone dans l'écosystème forestier	3
Tableau 2. Quelques estimations de la quantité de carbone mesurée en forêt, contenue dans 1 m ³ de bois (feuillu et résineux)	7
Tableau 3. Comparaison des stocks de carbone pour quelques pays européens (d'après Brändli, 2010) ..	8
Tableau 4. Quelques valeurs de production primaire nette et de production nette	9
Tableau 5. Stocks de carbone dans la biomasse aérienne en fonction de la durée du cycle sylvicole et du mode de gestion	16
Tableau 6. Durées de vie des produits issus des 5 sous-filières.....	26
Tableau 7. Quantité de carbone économisée par la substitution du bois comme matériau	28
Tableau 8. Comparaison des pouvoirs calorifiques du bois et autres combustibles (d'après Leturcq, 2011 ; Guinard, 2012)	29
Tableau 9. Quantité de carbone économisée par la substitution du bois comme énergie.....	29

Liste des figures

Figure 1.	Évolution de la matière organique du sol	5
Figure 2.	Répartition du carbone pour les 3 types d'humus (Nys & al., 2002)	5
Figure 3.	Concentration en carbone et temps de résidence de la matière organique dans un sol forestier	6
Figure 4.	Calcul de la quantité de carbone dans la biomasse	7
Figure 5.	Les flux de carbone forestier pour la France en regard des émissions de GES dues aux énergies fossiles (d'après Luysaert & al., 2010).....	9
Figure 6.	Carte des forêts de Rhône-Alpes distinguant noyaux forestiers anciens et forêts récentes (d'après Vallauri & al., 2012)	11
Figure 7.	Volumes à l'hectare de bois en Rhône-Alpes et en Suisse (d'après IFN, 2010 ; Brändli, 2010) ..	11
Figure 8.	Le cycle sylvigénétique résumé en 5 phases (mosaïque de taches unitaires > 200 m ²) (Rossi et Vallauri, 2013)	14
Figure 9.	Stock de carbone dans la biomasse aérienne en fonction de l'âge du peuplement (Lecoq & al., 2008).....	14
Figure 10.	Évolution de l'augmentation annuelle du stock de carbone dans l'écosystème forestier en fonction de l'âge (d'après Luysaert, 2008)	15
Figure 11.	Relation entre allongement de la durée du cycle sylvicole et augmentation du stock de carbone sur pied en fin de cycle (d'après Lecoq & al., 2008).....	16
Figure 12.	Taux de carbone dans les sols et les humus pour quelques essences françaises (Nys & al., 2002)	17
Figure 13.	Simulation de 9 scénarios de gestion pour des peuplements tempérés nord-américains (Nunery et Keeton, 2010)	18
Figure 14.	Évolution des teneurs en carbone organique total dans le sol après une coupe rase (Landes) (Jolivet, 2000 in Citeau & al., 2008).....	20
Figure 15.	Carte du stock de carbone aérien et racinaire en tC/ha en forêt de production sur la période 2008-2012 (IGN, 2014).....	21
Figure 16.	Les volumes de bois récoltés en France répartis par usages (volume sur écorce, d'après Deheza et Bellassen, 2010 ; FCBA, 2014 ; les durées de vie sont reprises de Vallet, 2005).....	24
Figure 17.	Analyse du cycle de vie d'un produit de construction bois (d'après Vallet, 2005)	26
Figure 18.	Récolte en forêt de Rhône-Alpes par catégorie de produits (d'après Agreste, 2011)	31
Figure 19.	Schématisation de trois logiques possibles pour décider de l'âge d'exploitation en forêt	34

Annexe : Petit exercice de prospective. Modélisation de 5 scénarii sylvicoles

4 scénarii de gestion ont été envisagés afin d'analyser l'efficacité du stockage de carbone, à la fois par l'écosystème forestier et les produits bois. On modélise :

- L'évolution du stock de carbone dans la biomasse sur pied,
- L'évolution du stock de carbone dans les produits bois tirés de l'exploitation,
- L'évolution des économies de carbone liées à la substitution.

Un témoin est ajouté à la modélisation (évolution de la forêt française sans interventions sylvicoles).

Hypothèses de départ

Plusieurs hypothèses sont formulées pour simplifier l'exercice. Sont fixées comme valeurs constantes :

- La surface forestière,
- L'accroissement, fixé à la valeur actuelle (87 m³/an, soit 32 MtC/an) (FCBA, 2014),
- La récolte, pour les scénarii 1,2 et 3, fixée à la valeur actuelle (56 Mm³/an, soit 20 MtC/an) (FCBA, 2014),
- Le stock de carbone du sol (1 074 MtC/ha ; Dupouey et Pignard, 2000),

De plus, le volume sur pied est plafonné à 300 m³/ha.

Stock des produits bois

Partant de l'hypothèse que la durée de vie d'un produit Bois d'œuvre (BO) est en moyenne de 9 ans, celle d'un produit Bois d'industrie (BI) de 3 ans, et celle du bois énergie (BE) de 1 an (Vallet, 2005), le stock de carbone total des produits bois est calculé en fonction de ces durées de vie, et de la part de la récolte (PR) dédiée à chacune des filières :

$$\text{Stock des produits bois} = 9 \times PR_{BO} + 3 \times PR_{BI} + 1 \times PR_{BE}$$

Effets de la substitution

Les effets de la substitution se cumulent au fil du temps. Il est considéré que l'utilisation d'un m³ de bois d'œuvre ou de bois d'industrie permet d'économiser 0,218 tC (Chenost & Rubio, 2008 ; Taverna & al., 2007). On tient également compte des rendements des filières, fixés à 50 % pour la filière bois d'œuvre et 88 % pour la filière bois d'industrie (Vallet, 2005). L'effet substitution du bois énergie n'est ici pas considéré du fait des réserves formulées dans ce rapport. Le stock de carbone annuel de la substitution est calculé ainsi :

$$\text{Stock substitution} = 0,218 \times 50 \% \times PR_{BO} + 0,218 \times 88 \% \times PR_{BI}$$

Le stock de l'année n se cumule au stock de l'année n-1.

Description des scénarii

Les scénarii sont les suivants.

1. Exploitation actuelle

La récolte est de 56 Mm³ chaque année. La répartition dans les sous-filières reste constante, fixée sur les proportions actuelles : 30 % pour le bois d'œuvre, 20 % pour le bois d'industrie, 50 % pour le bois énergie.

2. Priorité au bois d'œuvre

La récolte est de 56 Mm³ chaque année. La répartition dans les sous-filières évolue jusqu'à atteindre les proportions suivantes : 50 % pour le bois d'œuvre, 30 % pour le bois d'industrie, 20 % pour le bois énergie.

3. Priorité au bois énergie

La récolte est de 56 Mm³ chaque année. La répartition dans les sous-filières reste évolue jusqu'à atteindre les proportions suivantes : 10 % pour le bois d'œuvre, 13 % pour le bois d'industrie, 77 % pour le bois énergie.

4. Augmentation de la récolte

La récolte augmente annuellement jusqu'à atteindre 75 % de l'accroissement soit 65 Mm³/an. La répartition dans les sous-filières reste constante, fixée sur les proportions actuelles : 30 % pour le bois d'œuvre, 20 % pour le bois d'industrie, 50 % pour le bois énergie.

Résultats

La biomasse sur pied est le compartiment qui contient le stock de carbone le plus important (figure 1) : 2 193 MtC (pour un volume sur pied plafonné à 300 m³/ha). Les stocks des produits bois atteignent 40 à 110 MtC selon les scénarii (tableau 1). Le stock de carbone des produits bois du scénario *Priorité au Bois d'œuvre* est nettement supérieur à celui des autres scénarii.

Tableau 1. Évolution des stocks de carbone dans la biomasse aérienne et les produits bois, et effet de la substitution pour 4 scénarii sylvicoles

Stocks de carbone (en MtC)	2020	2040	2100	2140
Sol	1 074	1 074	1 074	1 074
Biomasse sur pied (plafonnée à 300 m ³ /ha)				
<i>Témoïn, sans exploitation</i>	1 393	2 033	2 193	2 193
<i>Exploitation actuelle, Priorité Bois d'œuvre, Priorité Bois énergie</i>	1 217	1 465	2 193	2 193
<i>Augmentation de la récolte</i>	1 203	1 385	1 929	2 193
Produits bois				
<i>Exploitation actuelle</i>	74	74	74	74
<i>Priorité Bois d'œuvre</i>	89	110	110	110
<i>Priorité Bois énergie</i>	64	40	40	40
<i>Augmentation de la récolte</i>	86	87	87	87
Effet de la substitution				
<i>Exploitation actuelle</i>	36	115	354	513
<i>Priorité Bois d'œuvre</i>	40	158	534	785
<i>Priorité Bois énergie</i>	33	86	207	287
<i>Augmentation de la récolte</i>	38	131	407	592

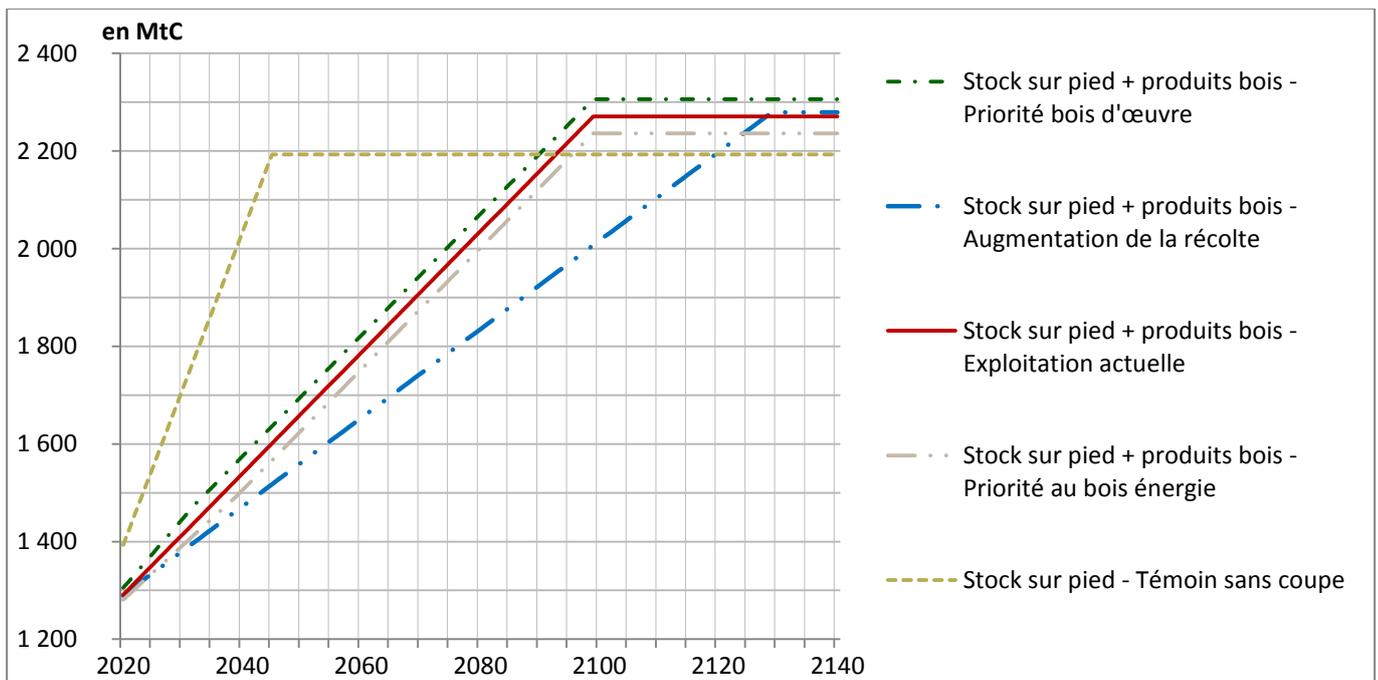


Figure 1. Modélisation de l'évolution des stocks de carbone dans la biomasse aérienne et les produits bois récoltés en France métropolitaine selon 5 scénarios (au choix)

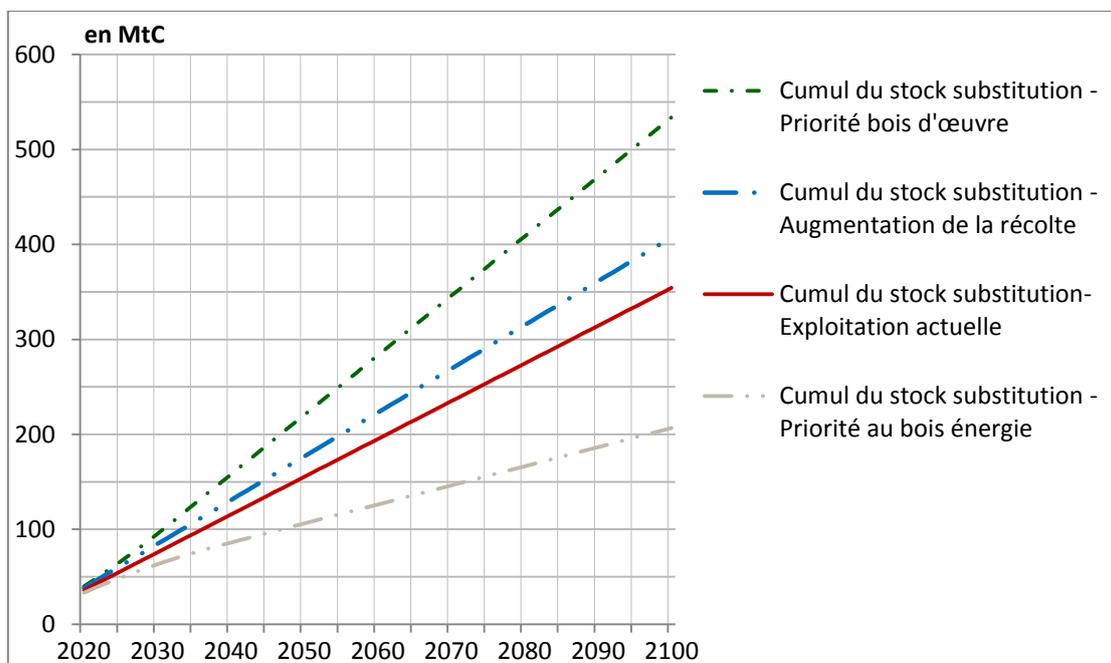


Figure 2. Modélisation de l'évolution du cumul des économies de carbone dues à l'utilisation de bois d'œuvre et de bois d'industrie récoltés en France en substitution à d'autres matériaux

Les effets de la substitution sont plus intéressants pour le scénario *Priorité au Bois d'œuvre* que pour les autres scénarii. On constate, que comme pour le stock de carbone des produits bois, la répartition de la récolte entre les différentes filières selon la hiérarchie Bois d'œuvre > Bois d'industrie > Bois énergie est plus importante que le volume récolté.

En conclusion, si l'on souhaite optimiser le stockage de carbone de la forêt à l'aval de la filière bois, il est préférable d'augmenter la part du bois d'œuvre et du bois d'industrie dans la récolte que le volume récolté, et il est crucial de maintenir un volume sur pied qui ne soit pas trop faible. Les atouts du bois d'œuvre en termes de stockage de bois d'œuvre peuvent encore être améliorés en augmentant les rendements des 1^{ère} et 2^{nde} transformations (intérêt du tri des produits en amont), et la durée de vie des produits (intérêt du recyclage).

Le carbone forestier en mouvements

Éléments de réflexion pour une politique maximisant les atouts du bois

Résumé

Les écosystèmes forestiers français métropolitains stockent annuellement l'équivalent d'un tiers des émissions de CO₂ françaises, en captant 32 MtC/an. Le sol joue un rôle clé dans l'écosystème forestier en stockant plus de 50 % du carbone total. Ce carbone se répartit tout le long du profil, des humus aux horizons profonds, certaines molécules ayant des durées de vie plusieurs centaines à milliers d'années.

Le stock de carbone des forêts françaises métropolitaines est évalué en 2000 à 2 211 MtC (dont 1074 MtC dans le sol). Les stocks les plus élevés sont localisés dans les futaies à cycle sylvicole long, pour la plupart des forêts anciennes. En comparaison, les produits bois situés sur le territoire français métropolitain représentaient environ 85 MtC en 2008. Le volume de produits bois récoltés chaque année dans la forêt française représente 20 MtC/an. Ces stocks sont à relativiser par la durée de vie des produits (analyse des cycles de vie). En sus, la substitution par le bois d'autres matériaux (acier, béton, aluminium) équivaldrait à 3 MtC/an. Ce calcul est plus délicat pour la substitution des énergies fossiles par le bois énergie. Il est indispensable, au risque d'un raisonnement faux, de considérer la durée de vie des produits bois, la nécessaire hiérarchie à instaurer entre les usages (bois d'œuvre > bois d'industrie > bois énergie) et le principe d'additionnalité. En tout état de cause, la substitution par le bois énergie représenterait environ 5 MtC/an.

Pour mener une gestion forestière efficiente en termes de stockage du carbone, tout en considérant les aspects économiques, écologiques et sociaux cruciaux, il est recommandé : d'allonger les cycles sylvicoles (une forêt plus âgée possède une capacité de stockage du carbone maximale), d'éviter les coupes rases (il faut au moins 50 ans pour que le stock de carbone du sol revienne à son état avant coupe) et de préférer les interventions prudentes et continues, de conserver bois mort et rémanents en forêt (ils contribuent à l'augmentation tant du stock de carbone du sol que de la fertilité). Les traitements irréguliers à couvert continu constituent un mode de gestion intéressant à développer.

Magali Rossi

magali.rossi@gmail.com
magalirossi.wordpress.com

Jean André

je.andre@free.fr
refora.online.fr

Daniel Vallauri

