

**Mémoire de fin d'études :**  
M2 Dynamiques Territoriales & Paysages  
/Paysages et Médiation

[Année universitaire 2011-2012]



*présentée et soutenue par*

Miriam **BUITRAGO ESQUINAS**

le 4 octobre 2012

# « Evaluation des stratégies forestières d'atténuation du changement climatique en France métropolitaine »

---

**Une revue de la littérature scientifique et du  
positionnement des principaux acteurs**

**Enseignant de référent :** Hervé **DANIEL**

**Maîtres de stage :** Caroline **RANTIEN** et Isabelle **FEIX**



**Mémoire de fin d'études :**  
M2 Dynamiques Territoriales & Paysages  
/Paysages et Médiation

[Année universitaire 2011-2012]



*présentée et soutenue par*

Miriam **BUITRAGO ESQUINAS**

le 4 octobre 2012

# « Evaluation des stratégies forestières d'atténuation du changement climatique en France métropolitaine »

---

**Une revue de la littérature scientifique et du  
positionnement des principaux acteurs**

**Enseignant de référent : Hervé DANIEL**

**Maîtres de stage : Caroline RANTIEN et Isabelle FEIX**



## **Avertissement :**

L'ADEME remercie vivement les personnes ayant été associées au suivi de cette étude. Les nombreux échanges ont permis de mettre en évidence différents points de vue sur les stratégies sylvicoles permettant d'atténuer le changement climatique. En dépit de la rigueur et de l'objectivité apportées à l'étude de ces stratégies, différentes analyses peuvent être envisageables. Aussi, le contenu de ce rapport n'engage que son auteur. Toutes interprétations, positions et conclusions ne peuvent pas être attribuées à l'ADEME.

## **Remerciements,**

Merci à la structure d'accueil, l'ADEME, et en particulier à Jérôme MOUSSET, chef du Service Agriculture et Forêt, pour m'avoir confié cette mission sur cette thématique passionnante. Merci encore pour l'importance donnée à mon travail dès les premiers jours et pour avoir facilité mon intégration au sein de l'équipe du Service.

Je tenais également à remercier mes maîtres de stage : Caroline RANTIEN, Animatrice biomasse ressource et mobilisation dans le Service Agriculture et Forêt, et Isabelle FEIX, Expert national "sol" dans la Direction Productions et Energies Durables. Merci pour leur implication importante dans mon travail, leurs conseils et leur soutien tout au long de mon stage. A tout moment, je me suis sentie accompagnée et épaulée dans la réalisation de ma mission.

Merci à Roland GERARD, chef adjoint du Service Bioressources, à Alba REPARTE, ingénieure au Service Bioressources, et à Thomas GOURDON, ingénieur au Service Climat, qui ont participé à enrichir les débats lors des réunions de suivi de mon stage.

J'adresse également mes remerciements à Hervé DANIEL, enseignant-chercheur référant pour l'Agrocampus Ouest Centre Angers, pour son aide et ses conseils méthodologiques. Sans lui, la vision des acteurs n'aurait peut-être pas pris toute la place qu'elle méritait au sein de mon mémoire.

Je tiens également à adresser un grand merci à toute l'équipe du Service Agriculture et Forêt de l'ADEME pour l'accueil chaleureux et l'amitié qu'ils m'ont témoigné.

Merci à toutes les personnes qui ont participé à l'enquête et qui ont, par leur disponibilité et leur bienveillance, enrichi mes réflexions.

Merci à Simon GEORGET et à Thomas GOURDON pour m'avoir aidé à rendre possible ce stage.

Merci, enfin, à mon compagnon de route et à nos deux enfants qui m'ont, par leur amour et leur infinie patience, offert les moments de réconfort indispensables à toute aventure humaine.



# Table des matières

<b>Introduction</b> .....	<b>11</b>
<b>Partie 1 : Contribution de la filière forêt-bois de la France Métropolitaine à l'atténuation du changement climatique selon différents scénarios d'exploitation</b> .....	<b>16</b>
1.1 La chaîne de valorisation du bois.....	16
1.2 Le cycle de carbone dans la filière forêt-bois .....	16
1.2.1 Le cycle du carbone dans les écosystèmes forestiers .....	17
1.2.2 Le cycle du carbone dans la filière bois .....	18
1.2.3 Le cycle du carbone lié aux changements directs et indirects d'affectation des sols..	19
1.3 Les stratégies d'atténuation de la filière forêt-bois : stratégie de stockage et stratégie de substitution.....	20
1.4 Chiffres clés sur la forêt française métropolitaine et son rôle dans le cycle du carbone ....	21
1.5 La contribution de la filière forêt bois à l'atténuation du changement climatique selon différents scénarios d'exploitation à travers d'une revue de la littérature scientifique .....	24
1.5.1 La variation de stock de carbone dans les écosystèmes forestiers selon le choix d'une stratégie de préservation ou d'exploitation .....	25
1.5.2 Stock de carbone dans le produit bois-matériau .....	32
1.5.3 Emissions nettes évitées par le remplacement des matériaux énergivores hors CO <sub>2</sub> biogénique (substitution matériaux).....	33
1.5.4 Emissions nettes évitées <i>via</i> le bois énergie hors CO <sub>2</sub> biogénique (substitution énergétique).....	34
1.5.5 Evaluation globale du bilan GES de la forêt et de la filière bois selon différents scénarios d'exploitation.....	35
1.5.6 D'autres considérations entre la forêt et le climat.....	43
1.6 Conclusion.....	44
Bibliographie .....	46
<b>Partie 2 : Impact sur le Changement Climatique de l'intensification des prélèvements de bois en forêt métropolitaine pour l'énergie</b> .....	<b>50</b>
1.1 Définition des émissions du carbone biogénique dans la filière bois énergie et hypothèses de neutralité.....	51
1.2 Limites des hypothèses de la neutralité du carbone biogénique .....	52
1.7 Le bénéfice du bilan CO <sub>2</sub> de la filière bois énergie avec la prise en compte du carbone biogénique à travers d'une revue de la littérature scientifique .....	53
1.7.1 Dans la filière bois énergie provenant de la collecte des rémanents .....	56
1.7.2 Dans la filière bois énergie provenant de récoltes additionnelles du bois dans la forêt existante .....	57
1.8 Conclusions .....	62
Bibliographie .....	63
<b>Partie 3 : Positionnement des acteurs de la filière forêt – bois en France Métropolitaine face à l'atténuation du changement climatique</b> .....	<b>66</b>
1.1 Les acteurs contactés lors de notre enquête .....	66
1.2 Informations récoltées .....	67
1.3 Conclusions générales de l'enquête .....	82
Bibliographie .....	83
<b>Conclusion</b> .....	<b>85</b>
Annexe 1 : Protocole de Kyoto et proposition législative de l'Union européenne.....	89
Annexe 2 : Grille d'analyse des articles scientifiques .....	91
Annexe 3 : Questionnaire .....	93
Anexe 4 : Liste d'acteurs interviewés .....	95

## Table des figures

Figure 1. Le cycle de carbone dans la forêt et la filière bois .....	17
Figure 2. Stratégies d'atténuation du secteur forestier. Source : IPCC, 2007b .....	20
Figure 3. Cycle du carbone d'un écosystème forestier (échelle de la parcelle) avant une stratégie de préservation ou d'exploitation durable .....	25
Figure 4. L'âge d'exploitabilité retenu pour une maximisation de la production du bois annuelle moyenne. Source : Madrigal, 1994 .....	27
Figure 5. Évolution du stock du carbone pour le <i>chêne sessile</i> et pour le <i>pine laricio</i> après la substitution du chêne. ....	28
Figure 6. Transformation d'un écosystème forestier ancien non exploité en une unité de gestion forestière exploitée (âge de coupe 60 ans et 40 ans). ....	30
Figure 7. Effet des prélèvements supplémentaires dans le stock de carbone dans un écosystème forestier de <i>Picea abies</i> dans les Alpes autrichiennes (comprend la biomasse vivante, la litière et le sol). Dans la figure (a) Niveau de prélèvement augmente de 60% à 80% de l'accroissement biologique annuel. Dans la figure (b) le prélèvement augmente de 60% à 80% de la biomasse aérienne dans la parcelle récoltée. La différence entre le stock C dans le scénario d'intensification de prélèvement (en pointillés, ligne grise) et celui dans le scénario sans intensification (trait plein, ligne grise) est représenté par la courbe variation de stock C (ligne noire, tracée sur l'axe secondaire-). Le point dans le temps, lorsque la gestion forestière a changé, est indiqué par l'année 0. Source : Zanchiet <i>al.</i> , 2011 .....	31
Figure 8 . Séquestration nette de carbone liée à la mise en exploitation d'une forêt mûre à l'échelle de la parcelle (comprend la variation de stock en forêt, le stock dans les produits et les effets de substitution matériau et énergie). Situation de départ : 1 ha de forêt mûre avec un stock de carbone 150 MgC/ha. Situation finale : 1 ha de forêt gérée (âge de coupe 60 ans) avec un stock de carbone de carbone 100 Mg C/ha. Source : Schlamandinger B et Marland G., 1996 .....	37
Figure 9. Séquestration nette de carbone liée à la mise en exploitation d'une forêt mûre à l'échelle de l'unité de gestion (comprend la variation de stock en forêt, le stock dans les produits et les effets de substitution matériau et énergie) Situation de départ : 100 ha de forêt mûre avec un stock de carbone 150 MgC/ha. Situation finale : 100 ha de forêt gérée (période de rotation 60 ans), superficie de coupe annuelle (1/60) x 100 ha. Source : Schlamandinger B et Marland G., 1996 .....	37
Figure 10 . Séquestration nette de carbone dans une parcelle de 1 ha de forêt exploitée (âge de coupe 60 ans) en comparaison avec la décision de ne pas poursuivre son cycle de coupe (nommé « oportunity cost »). Comprend la variation de stock en forêt, le stock dans les produits et les effets de substitution matériau et énergie. Source : Schlamandinger B et Marland G., 1996.....	38
Figure 11. Accumulation de carbone dans les écosystèmes forestiers dans les différents scénarios dans la forêt suisse. Source : Werner <i>et al.</i> (2010).....	41
Figure 12 . Accumulation des émissions nettes de CO <sub>2eq</sub> liées à la gestion de la forêt et la filière bois dans les différents scénarios pour la forêt suisse (comprend la variation de stock en forêt, le stock dans les produits et les effets de substitution matériau et énergie)Source : Werner <i>et al.</i> (2010).....	42
Figure 13. Cumulative CO <sub>2</sub> émissions et cumulative radiative forcing d'un scénario d'augmentation du niveau de récolte pour l'énergie. Source : Bird <i>et al.</i> , 2009 .....	43
Figure 14. Figure (a) Carbone total de la parcelle (tonnes de carbone) et évolution dans le temps (années) pour un scénario « <i>business as usual</i> » et pour un scénario « bois énergie » qui correspond à un prélèvement supplémentaire de 20 unités de bois. Figure (b) Comparaison de la variation de stock de carbone dans les écosystèmes des deux scénarios et des émissions qui auraient eu lieu pour créer la même quantité d'énergie avec l'utilisation d'énergies fossiles. Source : Walker <i>et al.</i> (2010).....	58
Figure 15. Figure (a) Carbone total de la parcelle (tonnes de carbone) et son évolution dans le temps (années) pour le scénario « <i>business as usual</i> » (prélèvement de 32 % du carbone de la biomasse aérienne de la parcelle) et pour le scénario « bois énergie » (réduction de la superficie terrière à 60 ft <sup>2</sup> par acre). Figure (b) Période de remboursement de la « dette carbone » selon le système fossile remplacé et la technologie de combustion utilisée. Source : Walker <i>et al.</i> (2010) .....	59

Figure 16. Émissions de consommation des ressources liées à l'utilisation de bois énergie provenant de récoltes supplémentaires comparées aux émissions du système fossile remplacé. Le facteur CN (ligne noire) tracé sur l'axe secondaire montre quand les émissions liées à l'augmentation du niveau de récolte sont supérieures (CN <1) ou inférieures (CN >1) aux émissions du système fossile. Dans le « cas 1 », le niveau de prélèvement augmente de 60% à 80% de l'accroissement biologique annuel. Dans le « cas 2 », le prélèvement augmente de 60% à 80% de la biomasse aérienne dans la parcelle récoltée. La figure sur la gauche, le système fossile remplacé est le charbon; figure sur la droite, le système fossile remplacé est le gaz. Source : Zanchiet *al.*, 2011 ..... 60

Figure 17. Émissions nettes de CO<sub>2</sub>éq. dans les différents scénarios. (a) production d'électricité à travers des granulés fabriqués à partir des rémanents, l'énergie remplacée est le charbon (taux de substitution de charbon par biomasse de 20 %) ; (b) éthanol produit à partir des rémanents, l'énergie remplacée est l'essence (carburant E85) ; (c) production d'électricité à travers des granulés fabriqués à partir d'arbres entiers, l'énergie remplacée est le charbon (taux de substitution de charbon par biomasse de 20 %) ; (d) éthanol produit à partir d'arbres entiers, l'énergie remplacée est l'essence (carburant E85). Source : Mckechnie *et al.* (2011) ..... 61

Figure 18. Comparaison du bilan GES atmosphérique des scénarios d'utilisation des énergies fossiles par rapport au scénario proposé (intensification du niveau de prélèvement pour la production d'énergie électrique) dans les forêts des régions sud-est des États-Unis. Source : Biomass Energie Ressource Center (2012)..... 62

## Liste des tableaux

Tableau 1. kg de C fossiles évités par m <sup>2</sup> de produit bois utilisé dans le secteur du logement en Finlande et en Suède. Source : Pingoud <i>et al.</i> (2012) .....	34
Tableau 2. Facteurs de dépendance et actions pour améliorer le coefficient de substitution .....	34
Tableau 3. Scénarios de prélèvement et utilisation du bois dans la forêt et filière bois suisse.....	40



# Introduction

Selon le quatrième rapport du Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC, 2007), le réchauffement actuel du climat global est sans équivoque. L'essentiel de l'élévation de la température moyenne du globe observée depuis le milieu du XXe siècle est très probablement attribuable à la hausse des concentrations de Gaz à Effet de Serre (GES) d'origine anthropique. Le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) est le gaz qui contribue le plus aux émissions anthropiques de GES, à hauteur de 77%.

Face aux risques que les modifications climatiques font courir aux systèmes naturels et socio-économiques, deux stratégies ont été mises en place : la réduction des émissions nettes de GES (encore appelée atténuation) et l'adaptation des systèmes naturels et socio-économiques aux changements climatiques.

Selon Ban Ki-mon, Secrétaire Général des Nations Unies : « *Climate change cannot be won without the world's forest. This, however, will be a complex and challenging feat* »<sup>1</sup> (conférence de presse, 2008). En effet, même si les forêts subissent les assauts du changement climatique, elles sont aussi capables de l'atténuer et ainsi de contribuer à la volonté politique internationale de limiter l'augmentation de la température moyenne du globe à 2°C. Ce défi soulève une question centrale. Comment optimiser la contribution du secteur forestier de la France métropolitaine à l'atténuation du changement climatique ? Notre travail a donc consisté à fournir des éléments de réponse à cette question dans le but de rendre possible l'accompagnement des territoires métropolitains dans la mise en place de stratégies forestières, climatiques et énergétiques optimisées et cohérentes entre elles.

L'objectif de ce travail est de conduire une analyse critique des stratégies d'atténuation du secteur forestier en France métropolitaine. Il est néanmoins important de noter que ces stratégies ne pourront être analysées qu'en prenant en compte l'effet du changement climatique sur la forêt, notamment sur le long terme.

Ce travail se concentre sur les stratégies d'atténuation, c'est-à-dire sur l'analyse de la gestion forestière optimale vis-à-vis de son bilan GES (notamment CO<sub>2</sub>). Cependant, il est important de noter que l'établissement d'une gestion globale des forêts nécessite la prise en compte des critères de multifonctionnalité, soit les critères environnementaux, économiques et sociaux. Les forêts servent ainsi à fournir des biens et services écosystémiques<sup>2</sup> définis comme tout ce qu'un écosystème produit et qui est utile à l'humain.

Ce mémoire a été réalisé dans le cadre d'un stage du master 2 professionnel « Paysages et médiations », collaboration entre l'Université d'Angers et Agrocampus Ouest. Ce stage, d'une durée de cinq mois, s'est déroulé au Service Agriculture et Forêt de l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) à Angers.

De manière générale, **les écosystèmes forestiers et la filière bois contribuent à l'atténuation du changement climatique de quatre façons différentes :**

- a) par le **stockage de carbone dans les écosystèmes** principalement dans deux réservoirs différents : la biomasse (aérienne et souterraine) et le sol (organique et minéral) ;
- b) par le **stockage temporel de carbone dans les produits bois**, cette temporalité étant variable selon la durée de vie du produit ;
- c) par **l'évitement d'émissions fossiles via l'utilisation de bois énergie** (substitution énergétique) ;
- d) par **l'évitement d'émissions fossiles via l'utilisation du bois matériau** au lieu de matériaux énergétivores.

Nous pouvons donc différencier deux stratégies d'atténuation du secteur forestier : les stratégies de stockage dans les écosystèmes<sup>3</sup> qui visent à maximiser le stock de carbone dans la forêt (biomasse et sol) et les

---

<sup>1</sup> « La lutte contre le changement climatique ne pourra pas être gagnée sans les forêts du monde. Ceci, cependant, sera un défi complexe et difficile », en français.

<sup>2</sup> Ces services sont souvent divisés en quatre catégories : services d'approvisionnement qui incluent les produits de première nécessité que nous consommons (aliments, eau douce, bois matériau, bois de feu, fibres, produits biochimiques, ressources génétiques, etc.) les services de régulation qui nous fournissent un milieu habitable (régulation du climat, purification de l'eau, pollinisation), les services culturels qui offrent aux gens des avantages non matériels (loisirs et écotourisme, patrimoine culturel, ...) et les services de soutien aux conditions favorables à la vie sur Terre (cycle des éléments nutritifs, cycle du carbone) qui sont par ailleurs nécessaires à la production de tous les autres services.

<sup>3</sup> Une stratégie de stockage élargie sera celle qui a pour but de maximiser le stock de carbone dans l'ensemble des réservoirs forestiers : écosystèmes et produits bois.

stratégies de substitution (énergétique et matériau) qui visent à minimiser les émissions fossiles dans l'atmosphère.

De nombreux scientifiques ont souligné les conflits possibles entre les stratégies de stockage dans les écosystèmes et les stratégies de substitution<sup>4</sup>. En effet, une stratégie de substitution peut conduire à une augmentation du niveau de prélèvement afin d'utiliser le maximum de quantité de bois en remplacement des autres combustibles fossiles ou matériaux énergétivores. En revanche, une stratégie de stockage peut conduire à une diminution du volume total de bois mobilisable afin d'augmenter le niveau de stock de carbone moyen par hectare.

Dans le contexte politique français, une des orientations forestières de la loi Grenelle est : « *Produire plus de bois tout en préservant mieux la biodiversité* ». Cette loi a prévu, sous réserve d'amélioration de la biodiversité, une utilisation croissante du bois dans la construction et l'habitat, et du bois énergie dans le bouquet des énergies renouvelables. Le comité opérationnel du Grenelle sur la forêt (2008) faisait référence à une ressource supplémentaire mobilisable, dans des conditions compatibles avec la gestion durable, de 21 millions de m<sup>3</sup> à l'horizon 2020 (9 millions de m<sup>3</sup> de bois d'œuvre et 12 millions de m<sup>3</sup> de bois énergie/industrie). Suite au Grenelle de l'environnement, le Plan d'action national en faveur des énergies renouvelables 2009-2020 fixe des objectifs ambitieux de production d'énergie à partir de la biomasse. Ainsi, ce plan fixe des objectifs de 7,4 Mtep supplémentaires pour la production de chaleur et de 1,2 Mtep supplémentaires pour la production d'électricité à partir de la biomasse. Le bois énergie est l'une des filières privilégiées pour atteindre ces objectifs, ce qui entraînera une augmentation des besoins en bois issu de la forêt métropolitaine. Ce plan prévoit une augmentation de la mobilisation de la ressource sylvicole de +3 à +5,4 Mtep en 2020. Nous pouvons donc remarquer que les lois Grenelle ont placé la filière forêt - bois au centre des enjeux qui permettent de relever le défi du changement climatique et de l'accroissement des énergies renouvelables. Suite à cette prise de décision, nous pouvons remarquer l'important développement de la filière bois énergie sur une grande partie des territoires métropolitains. Notons également que ces politiques, qui conduisent à une augmentation du niveau de récolte, sont basées sur les avantages que les stratégies de substitution peuvent générer par rapport aux stratégies de stockage dans les écosystèmes.

Il est cependant important de remarquer que ces politiques de substitution favorisant une mobilisation accrue du bois forestier prennent pour base la neutralité du carbone des émissions dues à l'oxydation ou à la combustion du bois<sup>5</sup>. Ceci revient donc à considérer que le stock du carbone dans la forêt est supposé stable dans le cadre d'une récolte du bois qui assure la régénération après la coupe. Cette neutralité supposée du carbone a donc pu masquer les possibles conflits entre les stratégies de stockage et les stratégies de substitution. Notons également que ces évaluations ne prenaient pas (ou très peu) en compte les différences de stocks de carbone dans les sols (malgré l'importance de ce stock qui représente généralement la moitié environ du stock forestier).

La décision prise lors de la conférence de **Durban** concernant l'intégration de l'Utilisation des Terres, Changements d'Affectations des Terres et Foresterie (UTCATF) dans les objectifs post Kyoto, suivie par une proposition législative de l'Union Européenne sur la même thématique, a souligné ces possibles conflits (voir Annexe 1). Ces nouvelles règles incluent l'obligation de comptabiliser les émissions et les captations de la gestion forestière basées sur un niveau de référence<sup>6</sup> projeté d'ici 2020 et calculé pour chaque pays sur la base d'un scénario « *business as usual* »<sup>7</sup>. Par conséquent, cette règle vise à mesurer l'incidence de la gestion forestière sur les stocks de carbone en forêt et dans les produits bois. En mesurant la variation de stock de carbone générée par la récolte du bois, ces règles visent une meilleure prise en compte des émissions dues à l'oxydation et à la combustion dans la filière. Ces règles visent également à augmenter le processus de stockage de carbone par les forêts et par les produits bois au-delà du scénario « *business as usual* » via la promotion de l'élaboration d'un plan d'actions pour favoriser le puits du carbone en forêt et dans les produits bois. Ce qui peut faire penser que **ces règles encouragent une stratégie de stockage**.

Le travail que nous avons conduit s'inscrit dans ce débat : « Stratégie de stockage *versus* stratégie de substitution ». Il faut remarquer que ce débat grandissant est l'initiative notamment des ONG

---

<sup>4</sup> Notons que les synergies entre les deux stratégies sont également possibles comme, par exemple, la promotion de techniques sylvicoles pour maximiser la production de biomasse, la promotion des pratiques sylvicoles qui n'affectent pas le niveau de prélèvement ou encore la mise en place d'une sylviculture préventive afin de diminuer le risque des incendies, des ravageurs ou l'effet des tempêtes.

<sup>5</sup> L'ensemble du CO<sub>2</sub> provenant de l'oxydation de la biomasse (ce qui inclut la combustion) est considéré comme étant capté lors de la croissance (passée ou future) de l'arbre (photosynthèse). La forêt étant supposée stable, le bilan CO<sub>2</sub> apparaît neutre.

<sup>6</sup> Le niveau de référence pour la France est de -67,410 Mt CO<sub>2</sub> eq./an (il inclut les variations du réservoir de produits ligneux récoltés estimé à -4,301 Mt CO<sub>2</sub> eq./an).

<sup>7</sup> « Fil de l'eau », en français.

environnementalistes (par exemple Greenpeace Canada, WWF, FNE)<sup>8</sup> et de certains auteurs scientifiques (par exemple Leturq, 2011 ;Haberl. *et al.*, 2012 ; Schulze *et al.*, 2012)<sup>9</sup>. Selon ces acteurs, l'augmentation de la mobilisation de biomasse forestière à des fins énergétiques menace non seulement la biodiversité et les sols (sa fertilité) mais risque aussi à terme d'accentuer les émissions de CO<sub>2</sub>.

L'ADEME est consciente de ce débat et de la complexité de la thématique. Parmi ses actions, l'ADEME a mis en place un groupe de travail interne nommé « carbone biogénique » dont l'objectif est une meilleure prise en compte des émissions liées à la dégradation et à la combustion de la biomasse. Ce groupe de travail a notamment travaillé sur les enjeux climatiques de la forêt. Le travail que j'ai entrepris durant mon stage et présenté dans ce mémoire poursuit les réflexions menées par ce groupe de travail et prend comme base les conclusions de son rapport final (ADEME, 2011).

Dans ce travail, nous abordons principalement la question de l'augmentation du niveau de prélèvement : est-ce qu'une intensification de l'exploitation forestière peut contribuer à atténuer le changement climatique ?

Une première partie analyse les effets sur le climat d'une augmentation du prélèvement dans la forêt existante pour la filière bois dans son ensemble (bois matériau et bois énergie). Une deuxième partie analyse également les effets sur le climat d'une augmentation du prélèvement mais seulement pour la génération d'énergie. Enfin, une troisième partie évalue le positionnement des acteurs dans ce débat.

Ci-dessous, nous donnons plus précisément les objectifs de nos parties.

- La première partie : « Contribution de la filière forêt-bois de la France Métropolitaine à l'atténuation du changement climatique selon différents scénarios d'exploitation »

Notre objectif, dans cette première partie, est de conduire une revue de la littérature et de résumer les principaux résultats des études scientifiques qui évaluent le bilan GES de la globalité de la filière forêt-bois selon différents scénarios d'exploitation. Nous tenterons ainsi de répondre aux questions suivantes :

- Quelle est la contribution de la filière forêt-bois à l'atténuation du changement climatique selon différents scénarios d'exploitation et d'utilisation du bois ?
- Quel équilibre trouver entre la séquestration du carbone dans les écosystèmes et la substitution au profit des matériaux économes en énergie et des énergies renouvelables issues du bois ?
- La deuxième partie : « Impact sur le Changement Climatique de l'intensification des prélèvements de bois en forêt métropolitaine pour l'énergie »

Notre objectif, dans cette deuxième partie, est de présenter les résultats d'évaluations d'impact sur le climat de la mise en place d'une filière bois énergie alimentée par du bois provenant de récoltes supplémentaires dans la forêt existante.

- Est-ce que la filière bois énergie peut être considérée comme carbone neutre ?
- Quel est le bénéfice du bilan GES de la filière bois énergie issue d'une augmentation du prélèvement dans la forêt existante à court, moyen et long terme ?
- La troisième partie: « Positionnement des acteurs de la filière forêt - bois en France Métropolitaine face à l'atténuation du changement climatique »

Le objectif de cette troisième partie est de donner des éléments de réponse aux questions des deux parties précédentes en nous appuyant sur des entretiens menés auprès d'experts nationaux impliqués dans des

---

<sup>8</sup> Par exemple :

- Greenpeace Canada, « De biomasse à biomascarade. Pourquoi brûler des arbres à des fins énergétiques menace le climat, les forêts et la population », octobre 2011.
- WWF France, « Position, Biomasse forestière et biodiversité », août 2007.
- FNE, « Note de position FNE. Production, gestion et utilisation du bois énergie », 02/08/2010.

<sup>9</sup> Par exemple :

- Leturq, 2011. "Bois énergie : une fausse bonne solution pour l'effet de serre"  
<http://www.pijouls.com/blog/wpcontent/uploads/2010/09/Bois-%C3%A9nergie-une-fausse-bonne-solution.pdf>
- Haberl H., et al, 2012. Correcting a fundamental error in greenhouse gas accounting related to bioenergy. *Energy Policy* 45, pp. 18-23.
- Schulze E.-D. et al. 2012. Large-scale bioenergy from additional harvest of forest biomass is neither sustainable nor greenhouse gas neutral. *GCB Bioenergy*, doi: 10.1111/j.1757-1707.2012.01169.x .

travaux sur la relation entre la filière forêt bois et le carbone. Parmi ces acteurs, nous trouvons des représentants des Ministères concernés (Ministère de l'Ecologie, du Développement durable et de l'Energie et Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt), des représentants des propriétaires et de gestionnaires de la forêt, des représentants des industriels mobilisant et transformant le bois, des représentants de la certification forestière, des représentants des associations environnementales ainsi que des représentants du secteur de la recherche et des centres techniques.

Les deux premières parties sont basées sur une analyse de la bibliographie scientifique. Dans un premier temps, nous avons sélectionné des articles scientifiques internationaux pertinents dont les résultats devaient nous permettre de répondre à notre questionnement. Dans ce cadre, une recherche systématique a été réalisée avec l'aide **des moteurs de recherche Science Direct et Web of Science**. Nous avons **sélectionné 286 articles** sur cette thématique. 55 d'entre eux sont des études de cas qui évaluent le bilan GES de la forêt selon différents scénarios d'exploitation. **Seulement dix d'entre eux sont des études de cas qui évaluent le bilan GES de la globalité de la filière forêt-bois selon différents scénarios d'exploitation et ce sont eux qui nous ont servi de base pour la première partie**. Par ailleurs, 8 d'entre eux sont des études de cas qui évaluent le bilan GES de prélèvements supplémentaires pour l'énergie. Ces études de cas sont localisées sur des écosystèmes forestiers dont les conditions sont similaires à celles de la France métropolitaine. Dans un deuxième temps, nous avons conduit une analyse approfondie de ces 18 articles (10 dans la première partie et 8 dans la deuxième) *via* une grille d'analyse prédéfinie (Annexe 1).

Dans ce mémoire, le caractère indépendant de chaque partie nous a conduit à inclure la bibliographie à la suite de chacune d'elles.

Pour terminer cette introduction, nous souhaiterions faire remarquer que le débat abordé dans ce travail est susceptible d'avoir des implications directes sur les politiques forestières et énergétiques territoriales qui conditionnent les dynamiques territoriales et donc ses paysages. La modification des pratiques sylvicoles avec, par exemple, la mise en exploitation de forêts anciennes, un changement des espèces ou encore la mise en place de plantations énergétiques comme les taillis à courte rotation, modifie les paysages ainsi que leur utilisation par leurs populations.

La troisième partie de ce document peut être considérée comme un exercice de médiation. Nous avons en effet rencontré des acteurs portant différentes visions, objectifs et types d'actions. Ces entretiens nous ont permis de récolter une pluralité d'avis et de positions, parfois opposées autour de cette thématique complexe et au cœur de l'actualité politique énergétique et environnementale.

# Partie 1 :

## Contribution de la filière forêt-bois de la France Métropolitaine à l'atténuation du changement climatique selon différents scénarios d'exploitation

---

### Sommaire

<b>Partie 1 : Contribution de la filière forêt-bois de la France Métropolitaine à l'atténuation du changement climatique selon différents scénarios d'exploitation .....</b>	<b>16</b>
1.1 La chaîne de valorisation du bois.....	16
1.2 Le cycle de carbone dans la filière forêt-bois .....	16
1.2.1 Le cycle du carbone dans les écosystèmes forestiers .....	17
1.2.2 Le cycle du carbone dans la filière bois .....	18
1.2.3 Le cycle du carbone lié aux changements directs et indirects d'affectation des sols..	19
1.3 Les stratégies d'atténuation de la filière forêt-bois : stratégie de stockage et stratégie de substitution.....	20
1.4 Chiffres clés sur la forêt française métropolitaine et son rôle dans le cycle du carbone ....	21
1.5 La contribution de la filière forêt bois à l'atténuation du changement climatique selon différents scénarios d'exploitation à travers d'une revue de la littérature scientifique .....	24
1.5.1 La variation de stock de carbone dans les écosystèmes forestiers selon le choix d'une stratégie de préservation ou d'exploitation .....	25
1.5.2 Stock de carbone dans le produit bois-matériau .....	32
1.5.3 Emissions nettes évitées par le remplacement des matériaux énergétiques hors CO <sub>2</sub> biogénique (substitution matériaux).....	33
1.5.4 Emissions nettes évitées <i>via</i> le bois énergie hors CO <sub>2</sub> biogénique (substitution énergétique).....	34
1.5.5 Evaluation globale du bilan GES de la forêt et de la filière bois selon différents scénarios d'exploitation.....	35
1.5.6 D'autres considérations entre la forêt et le climat.....	43
1.6 Conclusion.....	44
Bibliographie.....	46

# Partie 1 : Contribution de la filière forêt-bois de la France Métropolitaine à l'atténuation du changement climatique selon différents scénarios d'exploitation

Sur la base d'une **revue de la littérature scientifique internationale**, cette partie a pour but de donner des éléments de réponse quant à la compréhension des questions suivantes :

- Comment optimiser la contribution de la forêt française métropolitaine et ses filières bois matériau et bois énergie à l'atténuation du changement climatique ?
- Est-ce qu'une intensification de l'exploitation forestière peut contribuer à atténuer le changement climatique ?
- Quelle est la contribution de la filière forêt-bois à l'atténuation du changement climatique selon différents scénarios d'exploitation ?
- Quel équilibre trouver entre la séquestration du carbone dans les écosystèmes et la substitution au profit des matériaux économes en énergie et des énergies renouvelables issues du bois ?

Cette partie est basée sur une **analyse approfondie de dix articles** (Werner *et al.*, 2010 ; Lecoq *et al.*, 2011 ; Chandra Poudel *et al.*, 2011 ; Erickson *et al.*, 2007 ; Hudiburg *et al.*, 2011 ; Botcher *et al.*, 2007 ; Seidl *et al.*, 2007 ; Jong *et al.*, 2007 ; Pingoud *et al.*, 2010). Ces articles scientifiques sont **des études de cas qui évaluent le bilan GES de la globalité de la filière forêt-bois selon différents scénarios d'exploitation**. Ces études sont localisés dans des écosystèmes forestiers dont les conditions sont similaires à celle de la France métropolitaine.

Avant de mener l'analyse de ces études de cas (Section 1.5.), nous présentons une brève description de la chaîne de valorisation du bois (Section 1.1.), du cycle de carbone dans la filière forêt-bois (Section 1.2.), les principales stratégies forestières d'atténuation du changement climatique (Section 1.3.) ainsi que les chiffres clés sur la forêt française métropolitaine et son rôle dans le cycle du carbone (Section 1.4.).

## 1.1 La chaîne de valorisation du bois

Parmi les services rendus à la société par la forêt, la production durable de bois constitue une des vocations des forêts de France métropolitaine. La récolte du bois de l'exploitation directe des forêts est valorisée selon ses dimensions et sa qualité, en bois d'œuvre, en bois d'industrie et en bois énergie. Le bois d'œuvre, bois du tronc des arbres de grande dimension, est notamment utilisé dans le secteur de la construction, de l'ameublement et de l'emballage. Le bois d'industrie, bois du tronc des arbres de moindres dimensions<sup>10</sup>, de la partie supérieure du tronc et des branches, est trituré pour la fabrication de pâte à papier ou de panneaux pour la menuiserie ou l'ameublement, ou dans le secteur émergent de la chimie du végétale. Le bois énergie provient des mêmes compartiments que le bois d'industrie ainsi que de la collecte du menu bois<sup>11</sup>. Outre ces éléments, les produits connexes de scieries et les produits bois en fin de vie peuvent être valorisés par la filière industrielle ou énergétique. Nous pouvons donc noter que la chaîne de valorisation du bois est complexe et qu'il existe une interrelation importante entre les différentes sous-filières au sein de l'ensemble de la filière bois.

## 1.2 Le cycle de carbone dans la filière forêt-bois

Afin d'évaluer les stratégies d'atténuation du secteur forestier, il est fondamental d'analyser l'implication de ce secteur dans le cycle de carbone. Pour cela, **la définition des limites des implications du secteur forestier dans le cycle global de carbone est essentielle. En fonction des compartiments de carbone**

---

<sup>10</sup> De dimensions inférieures à 15 ou 20 cm selon les conditions économiques des territoires et les pratiques sylvicoles.

<sup>11</sup> Extrémité des branches et du tronc de diamètre sur écorce inférieur à 7 cm, parfois qualifié de rémanents.

**pris en compte (biomasse végétale, sol, stock dans les produits, énergies fossiles évitées), les conclusions peuvent être très différentes.**

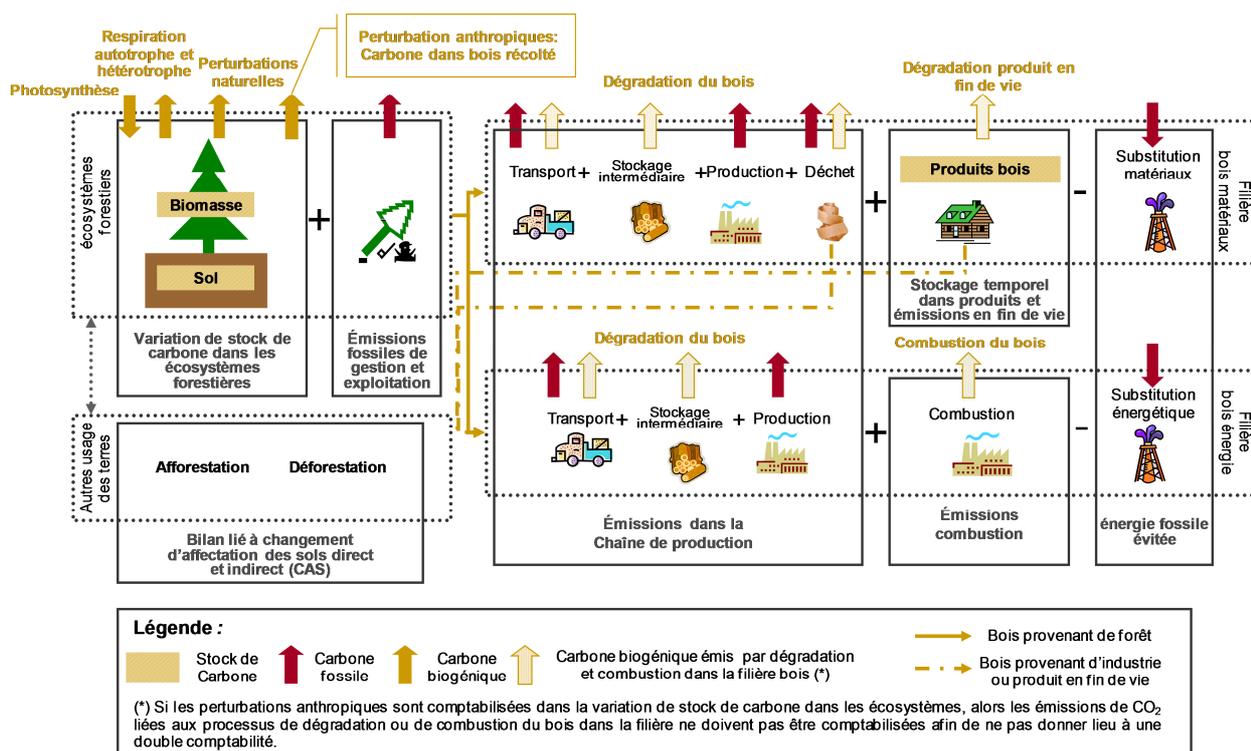
Le contenu de cette première section est basé sur l'analyse de trois rapports internationaux :

- « The Fourth Assessment Report of the IPCC : "The Physical Science Basis" et "Mitigation" » ( IPCC, 2007a et b) ;
- « Guidelines for national greenhouse gas inventories. Volume 4 : Agriculture,forestry and other land use ». (IPCC, 2006) ;
- « Glossaire du Changement climatique et de la bioénergie de la FAO » (FAO, 2009).

Le cycle du carbone (CO<sub>2</sub> et CH<sub>4</sub>) est le plus important, en termes de GES biogéniques émis, mais le cycle de l'azote est également présent, *via* le N<sub>2</sub>O. Pour ne pas multiplier les difficultés, il a été décidé de ne pas aborder ce type d'émissions (et de captations) dans ce travail. Il faut toutefois noter qu'il existe des interactions entre ces 2 cycles.

La figure 1 représente schématiquement le cycle du carbone du secteur forestier et de la filière bois en différenciant le carbone fossile du carbone biogénique. Le carbone fossile correspond aux émissions pour la production d'énergie à travers les systèmes fossiles. Le carbone biogénique est ce qui est lié à des phénomènes biologiques (photosynthèses, respiration et dégradation du bois).

Une analyse approfondie de ce schéma est présentée dans les sections suivantes. Nous avons différencié trois parties : le cycle du carbone dans les écosystèmes, le cycle du carbone dans la filière bois et le cycle du carbone lié aux changements directs et indirects d'affectation des sols.



**Figure 1. Le cycle de carbone dans la forêt et la filière bois**

### 1.2.1 Le cycle du carbone dans les écosystèmes forestiers

En assimilant le CO<sub>2</sub> atmosphérique à travers le mécanisme de photosynthèse, la forêt constitue l'une des clés de voûte du cycle du carbone. Le carbone est stocké dans les écosystèmes forestiers ainsi que dans **cinq** différents réservoirs : biomasse aérienne, biomasse souterraine, litière, bois mort et sol (organique et mineral). Dans une forêt tempérée (comme c'est le cas de la France métropolitaine), le stock de carbone se

répartit pour moitié environ entre le sol et la biomasse végétale total<sup>12</sup>. La litière et le bois mort lors de leur dégradation contribuent à augmenter le stock de carbone du sol.

Comme le montre la figure 1, **Le bilan CO<sub>2</sub> d'un écosystème forestier est le bilan entre la photosynthèse<sup>13</sup>, la respiration autotrophe et hétérotrophe<sup>14</sup> et les perturbations naturelles et anthropiques. Ce bilan peut être estimé en comptabilisant la variation de stock de carbone dans les écosystèmes** ce qui comprend la variation dans tous les réservoirs de carbone des écosystèmes.

Le bilan CO<sub>2</sub> dans un écosystème forestier, ou la variation de son stock de carbone, dépend fortement de la gestion et de l'exploitation forestière menée par l'homme. La gestion forestière a une influence sur tous les facteurs qui composent le bilan CO<sub>2</sub> des écosystèmes :

- les processus de photosynthèse. Par exemple, *via* des éléments comme la plantation, la fertilisation ou le choix d'essence à croissance rapide, la photosynthèse peut être renforcée ;
- la respiration hétérotrophe. Par exemple, *via* le labour du sol ou de la collecte des rémanents ;
- les perturbations naturelles. Par exemple, certains travaux sylvicoles diminuent les risques des incendies en forêt ;
- les perturbations anthropiques. La récolte du bois extrait du carbone des forêts et le transfère à la filière bois. Les émissions du carbone stocké dans ce bois auront lieu lors de sa dégradation (oxydation ou fermentation) ou de sa combustion. Il y aura également un stockage temporel dans les produits bois.

**Par conséquent, une modification des pratiques sylvicoles menées dans un écosystème forestier conduit à une variation de stock de carbone dans les écosystèmes.**

Il est très important de remarquer que si **les perturbations anthropiques sont comptabilisées dans la variation de stock de carbone dans les écosystèmes, alors les émissions de CO<sub>2</sub> liées aux processus de dégradation ou de combustion du bois dans la filière ne doivent pas être comptabilisées afin de ne pas donner lieu à une double comptabilité.**

D'autre part, les activités humaines liées à la gestion et à l'exploitation de la forêt utilisent des machines qui génèrent des émissions fossiles (ex : tronçonneuses, camions de débardage, etc.).

## 1.2.2 Le cycle du carbone dans la filière bois

### **Filière bois matériau :**

Comme le montre la figure 1, le bilan GES de la filière bois matériau inclut trois volets :

- 1) Les émissions dans la chaîne de transformation :
  - les émissions fossiles : liées au transport, à la production et à la gestion des déchets ;
  - les émissions biogéniques : liées à l'oxydation du bois pendant le transport et le stockage intermédiaire et à la dégradation (oxydation, fermentation) des déchets du bois.
- 2) Le stockage temporel dans les produits et les émissions en fin de vie : les stocks de carbone dans les produits dépendent fortement de la durée de vie du produit. Le carbone peut être stocké dans les structures de construction pendant une longue période (quelques décennies). En revanche, le papier a une durée de vie très courte (quelques années). Les produits en fin de vie émettent du carbone à travers leur dégradation (oxydation ou fermentation). Il faut également noter que lorsque les produits arrivent en fin de vie et se retrouvent en décharge, leur dégradation peut émettre, en plus du CO<sub>2</sub>, du CH<sub>4</sub> - beaucoup plus impactant que le CO<sub>2</sub> vis-à-vis du changement climatique.

---

<sup>12</sup> Ce qui comprend toute la couverture arborée, arbustive et herbacée.

<sup>13</sup> Photosynthèse : Processus par lequel les plantes absorbent du dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) de l'air (ou du bicarbonate dans l'eau) pour créer des carbohydrates, en rejetant de l'oxygène (O<sub>2</sub>) au cours du processus.

<sup>14</sup> Respiration : Processus par lequel des organismes vivants transforment la matière organique en dioxyde de carbone, en produisant de l'énergie et en consommant de l'oxygène ; Respiration autotrophe : Transformation de matière organique en CO<sub>2</sub> par des plantes ; Respiration hétérotrophe : Transformation de matière organique en CO<sub>2</sub> par des organismes autres que des plantes.

- 3) La substitution matériau : le bois peut venir en substitution de matériaux énergétiques. Par exemple, la substitution des structures de béton par des structures en bois.

#### **Filière bois énergie :**

Comme le montre la figure 1, le bilan GES de la filière bois énergie inclut également trois volets :

- 1) Les émissions dans la chaîne de transformation :
  - les émissions fossiles : liées au transport, à la production (préparation comme le séchage, transformation comme la granulation, etc.) ainsi qu'au traitement de cendres ;
  - les émissions biogéniques : liées à l'oxydation du bois pendant le transport et au stockage intermédiaire.
- 2) Les émissions biogéniques lors de la combustion : la combustion du bois rejette dans l'atmosphère le carbone stocké dans le bois, principalement sous la forme de CO<sub>2</sub>. Toutefois, la combustion de bois émet aussi d'autres gaz à effet de serre : CH<sub>4</sub> et N<sub>2</sub>O. Notons que car la combustion du bois est rarement complète il y a toujours une émission d'imbrûlés : composés organiques (CO, COVNM, PCDD/F, 8HAP), particules (TSP, PM10, PM2,5, PM1,0), SO<sub>2</sub> et métaux. Ces émissions dépendent du type d'installation utilisée.
- 3) La substitution énergétique : le bois peut se substituer aux combustibles fossiles dans la production d'énergie.

Dans cette section, nous faisons référence aux émissions du carbone biogénique liées aux processus de dégradation et de combustion du bois dans la filière parce que c'est dans la filière où ces émissions ont lieu. Par contre, si les perturbations anthropiques sont comptabilisées dans la variation de stock de carbone dans les écosystèmes, alors les émissions de CO<sub>2</sub> liées aux processus de dégradation ou de combustion du bois dans la filière ne doivent pas être comptabilisées afin de ne pas donner lieu à une double comptabilité. Nous devons également remarquer que ces processus émettent également d'autres GES que le CO<sub>2</sub>. Ces émissions doivent toujours être prises en compte dans le cadre des évaluations du bilan GES de la filière forêt bois.

### **1.2.3 Le cycle du carbone lié aux changements directs et indirects d'affectation des sols**

Le changement direct d'affectation des sols se produit lors d'une déforestation ou d'une afforestation et modifie par conséquent l'usage de cette terre. Par exemple :

- a) une afforestation sur une terre agricole ou un pâturage ;
- b) une déforestation causée par une exploitation non durable de la forêt.

Dans le cas d'une afforestation, l'impact carbone peut être positif ou négatif et plus ou moins important selon le type d'usage de terre remplacé et le type de système forestier introduit.

Le changement indirect d'affectation des sols se produit lorsqu'une demande supplémentaire de bois est induit par les mécanismes de marché des changements d'affectation sur d'autres terres afin de produire des biens non destinés à la production du bois. Par exemple, des afforestation de terres agricoles ici induit à une diminution de produits agricoles qui peut conduire ailleurs à conversion de terres forestière en terres agricoles (IPCC, 2007b).

Dans ce travail, notre objectif est de comprendre **comment une modification des pratiques sylvicoles et du niveau d'exploitation de la forêt peut affecter le bilan GES de la filière forêt-bois. Nous avons donc décidé de nous limiter** à la forêt existante, c'est-à-dire à « **la forêt qui reste forêt** ». Ainsi, notre travail ne prend en compte ni l'afforestation ni la déforestation qui peuvent avoir lieu en France métropolitaine. Pourtant, sur le territoire national métropolitain, des actions d'afforestation peuvent être importantes. Par contre, le taux de déforestation y est très faible.

Une variable pouvant être d'une importance fondamentale est le niveau d'importation du bois en France métropolitaine. Par exemple, une diminution du niveau du prélèvement en France métropolitaine associée à une augmentation de la demande du bois peut conduire à une intensification de l'exploitation forestière en dehors du territoire national ou même à une augmentation du taux de déforestation (Werner *et al.*, 2010).

### 1.3 Les stratégies d'atténuation de la filière forêt-bois : stratégie de stockage et stratégie de substitution

Selon le chapitre foresterie du quatrième rapport du GIEC<sup>15</sup>: « *The design of a forest sector mitigation portfolio should consider the trade-offs between increasing ecosystem carbon stocks and increasing the sustainable rate of harvest and transfer of carbon to meet human needs* »<sup>16</sup> (IPCC, 2007b, p. 549). Provenant de ce rapport du GIEC, la figure 2 ci-dessus schématise cette idée. Cette figure résume le contenu de la figure 1.

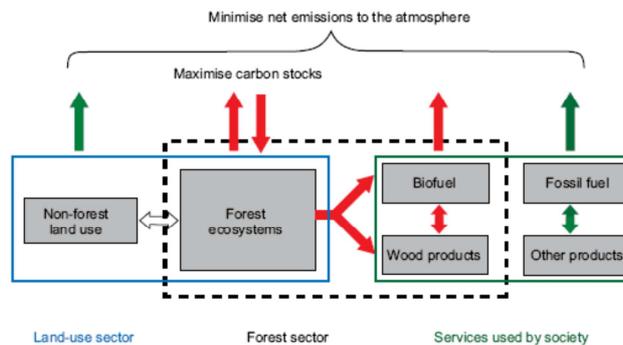


Figure 2. Stratégies d'atténuation du secteur forestier. Source : IPCC, 2007b

D'une part, nous analyserons les **stratégies de stockage dans les écosystèmes**. Comme le montre la section précédente (Section 1.1.), un écosystème forestier est composé principalement de **deux stocks de carbone** : la **biomasse végétale** (aérienne, souterraine) et le **sol** (organique et minéral). Une stratégie de stockage dans les écosystèmes forestiers a pour but de maximiser ces stocks de carbone.

Les stratégies de stockage dans les écosystèmes offrent diverses possibilités : « *pratiques consistant notamment à convertir des surfaces non forestières en forêts (boisement), à prévenir la conversion de surfaces forestières en d'autres types de terres (déforestation), à stocker du carbone dans les forêts existantes grâce à l'allongement des périodes de rotation forestières, à éviter les coupes à blanc (par exemple, au moyen de décisions de gestion forestière sur l'éclaircissage ou sur l'abattage sélectif) et à encourager la conversion en forêts non perturbées (sortes de zones de réserves), ainsi qu'à promouvoir le recours généralisé à des mesures de prévention destinées à limiter les incidences résultant de perturbations telles que les incendies, les ravageurs et les tempêtes. Il importe tout autant de rendre les forêts actuelles plus productives en calant le rythme des rotations sur la capacité productive maximale, en augmentant la production des forêts à faible productivité* »<sup>17</sup>.

D'autre part, si l'on prend en compte le secteur forestier dans son ensemble, d'autres stratégies d'atténuation doivent être analysées. Dans ces stratégies, la production du bois *via* une gestion durable de la forêt joue un rôle fondamental. Ces stratégies abordent la question de la saturation de carbone dans les écosystèmes forestiers. De façon théorique, le niveau du prélèvement annuel peut être établi afin d'être égal au inférieur ou niveau d'accroissement de la forêt. Par conséquent, le stock de carbone dans les écosystèmes peut être maintenu ou augmenté tout en fournissant un flux annuel de carbone pour répondre aux besoins de la société en fibre, bois et énergie.

Dans ce cadre, une première **stratégie est « le stockage dans les produits »**. Les forêts produisent du bois utilisé dans des produits qui stockent du carbone pendant la durée de vie du produit, c'est-à-dire qu'il existe un réservoir temporel du carbone dans les produits bois. Par conséquent, une stratégie de stockage élargie sera celle qui a pour but de maximiser le stock de carbone dans l'ensemble des réservoirs forestiers : écosystèmes et produits bois. Cette stratégie  **vise à maximiser la quantité du bois qui est destinée à des**

<sup>15</sup> IPCC par son abréviation en anglais.

<sup>16</sup> «La conception d'un portefeuille d'actions d'atténuation dans le secteur forestier devraient envisager le compromis entre l'augmentation des stocks de carbone dans les écosystèmes forestiers et l'augmentation de la récolte de façon durable et le transfert de carbone pour répondre aux besoins de l'homme», en français.

<sup>17</sup> Proposition de décision du parlement et du conseil européen relative aux règles comptables et aux plans d'action concernant les émissions et les absorptions de gaz à effet de serre résultants des activités liées à l'utilisation des terres, au changement d'affectation des terres et à la foresterie. Bruxelles, mars 2012.

**produits de longue durée de vie.** De façon générale, cette stratégie favorise la production de bois de très bonne qualité destinée, par exemple, aux structures dans la construction. Cette stratégie de stockage élargi incite donc à l'allongement de la durée de vie de tous les produits.

Une seconde stratégie est « **la stratégie de substitution** ». Les forêts produisent du bois dont l'utilisation peut se substituer à des combustibles fossiles (substitution énergétique) ou à des matériaux consommateurs d'énergie fossile pour leur production (substitution matériaux). Une stratégie de substitution a donc **pour but de minimiser les émissions fossiles dans l'atmosphère**. Les stratégies de substitution matériaux favorisent la production de produits qui remplacent des matériaux très émetteurs comme le béton, l'acier, l'aluminium ou le plastique. La stratégie de substitution énergétique a par but de substituer des systèmes fossiles de grande intensité GES comme le charbon ou le pétrole.

De nombreux auteurs ont observé les **possibles conflits entre les stratégies de stockage dans les écosystèmes et les stratégies de substitution. En effet, une stratégie de substitution peut conduire à une augmentation du niveau de prélèvement, par exemple lors d'une réduction de la période des révolutions d'exploitation ou de la mise en exploitation de zones non exploitées. En revanche, les stratégies de stockage favorisent l'allongement des périodes de rotation forestière ou encore la création de zones de réserve afin d'augmenter le niveau de stock de carbone moyen par hectare. Notons que les synergies entre les deux stratégies sont possibles comme, par exemple, la promotion de techniques sylvicoles pour maximiser la production de biomasse ou encore la mise en place d'une sylviculture préventive afin de diminuer le risque des incendies, des ravageurs ou des tempêtes.**

Le GIEC<sup>18</sup> indique : « *In the long term, a sustainable forest management strategy aimed at maintaining or increasing forest carbon stocks, while producing an annual sustained yield of timber, fibre, or energy from the forest, will generate the largest sustained mitigation benefit* »<sup>19</sup> (IPCC, 2007b, p. 543).

## 1.4 Chiffres clés sur la forêt française métropolitaine et son rôle dans le cycle du carbone

Comme préambule générale, nous donnerons quelques chiffres clés sur la forêt française métropolitaine et son rôle dans le cycle du carbone.

### La France, une nation avec une grande superficie forestière :

Les formations forestières couvrent selon les sources<sup>20</sup> 15 à 16 millions d'hectares, soit 28 à 29 % du territoire. La France est le quatrième pays européen en termes de surface forestière, derrière la Suède avec 28 millions d'hectares (Mha), la Finlande avec 22 Mha et l'Espagne avec 18 Mha (FAO, 2010).

### Large prédominance des forêts privées très morcelées :

Les forêts privées représentent 75 % de la surface de forêt de production. Le quart restant se répartit entre les forêts domaniales pour 10 % du total et les autres forêts publiques pour 15 %. La surface forestière privée est constituée pour plus de la moitié d'unités de moins de 25 hectares. La taille moyenne des propriétés forestières privées est aujourd'hui estimée à près de 3 hectares (MAAPRA, 2010).

### Large prédominance des forêts de feuillus :

Dans les forêts de production françaises métropolitaines, les feuillus sont prépondérant sur 71 % des surfaces (MAAPRA, 2010). Le restant, 29 %, correspond à des forêts de résineux.

### Grande représentation des forêts de moins de 60 ans :

La forêt de production est, à 49 %, âgée de moins de 60 ans et, à 22 %, âgée de plus de 100 ans. Cette répartition se décline en 42 % de la surface en dessous de 60 ans et 25 % au-delà de 100 ans pour les peuplements feuillus, et de 66 % et 13 %, respectivement, pour les peuplements résineux (MAAPRA, 2010).

---

<sup>18</sup> IPCC par son abréviation en anglais.

<sup>19</sup> « Sur le long terme, une stratégie de gestion durable des forêts visant à maintenir ou à augmenter le stock de carbone en forêt tout en approvisionnant la filière bois (grume, fibre et énergie) à un niveau de prélèvement durable, générera les bénéfices d'atténuation maximum »

<sup>20</sup> La surface des forêts selon SSP-Teruti-Lucas (2010) atteint 15,1 Mha ( $\pm 0,2$  Mha).

La surface des forêts de production selon l'IFN 2010 (campagnes d'inventaire 2006 à 2009) atteint désormais 15,3 Mha ( $\pm 0,1$ ). Les forêts de production représentent le 95 % de l'ensemble de la surface forestière.

### **Un volume sur pied qui augmente de l'ordre de 30 à 35 Mm<sup>3</sup> par an sur les dernières années :**

Le volume de biomasse aérienne sur pied en bois fort tige de la forêt française était de 1,7 milliard de mètres cubes (MMm<sup>3</sup>) en 1981<sup>21</sup>, de 2,1 MMm<sup>3</sup> en 1993<sup>22</sup> et de 2,4 MMm<sup>3</sup> en 2007<sup>23</sup>, soit une augmentation moyenne annuelle d'environ 25 millions de mètres cubes (Mm<sup>3</sup>) sur le dernier quart de siècle (IFN, 2011a). Ce chiffre a été précisé dans une publication ultérieure du IFN (IFN, 2011b) qui remarque que ce chiffre de 25 Mm<sup>3</sup>/an correspond à la tendance moyenne sur 26 ans, tempêtes comprises. Hors événements exceptionnels, la croissance moyenne annuelle du stock sur les dix dernières années pourrait être plus proche de 29 millions de mètres cubes que de 25. Dans cette publication, les auteurs précisent aussi le chiffre de la croissance moyenne annuelle sur la période 2005-2010 hors chablis Klaus comme le bilan des flux (production moins prélèvement moins mortalité). Le bilan sur la période 2005-2010 hors chablis Klaus est de 42 Mm<sup>3</sup>/an ( $90 \pm 3$  Mm<sup>3</sup>/an pour la production annuelle moyenne<sup>24</sup>, 40 Mm<sup>3</sup>/an  $\pm 4$  Mm<sup>3</sup> pour le prélèvement annuel et 7,9 Mm<sup>3</sup>  $\pm 0,6$  Mm<sup>3</sup> pour la mortalité).

Il faut remarquer que l'expression du volume IFN en bois fort tige n'est pas adaptée à toutes les problématiques émergentes comme le bois énergie ou l'estimation du stockage du carbone.

Afin d'estimer le potentiel du bois énergie, il faut considérer l'ensemble du volume aérien (tige + branches jusqu'à l'extrémité des bourgeons) des arbres recensables. Le volume aérien prélevé est estimé annuellement à 64 Mm<sup>3</sup> pour la période 2005-2010.

### **Puits carbone dans la biomasse de l'ordre de 14,3 Mt C (52,4 Mt CO<sub>2</sub>) par an sur les dernières années et un stock moyen actuel de 80 t C/ha :**

Afin d'établir la relation entre le volume en bois fort tige et le stock de carbone dans la biomasse, il est nécessaire de prendre en compte les branches ainsi que des coefficients comme les « facteurs d'expansion racines » pour inclure la biomasse souterraine, la « densité du bois » et le « taux de carbone » cités dans le Rapport final du projet de recherche Carbofor de 2004 (Loustau, 2010).

Le carbone contenu dans la biomasse des arbres<sup>25</sup> dans les forêts de production hors peupleraies, selon les chiffres du IFN inclus dans les indicateurs de gestion durable des forêts française 2010 (MAAPRA, 2010), était de 774 millions de tonnes de carbone (Mt C), soit 58 tonnes carbone par hectare (t C/ha) en « 1981 » ; de 984 Mt C soit 71 t C/ha en « 1993 » et de 1 137 soit 80 t C/ha en « 2007 ». Le stockage annuel net ou « puits » dans la biomasse arborée était évalué à 14,3 Mt C (52,4 Mt CO<sub>2</sub>)<sup>26</sup> par an pour la période 1986-2007. Ce puits représentait environ 10 % des émissions brutes de carbone nationales hors prise en compte de la forêt, de l'utilisation des terres et de leur changement.

Selon le rapport national d'inventaire pour la France au titre de la convention cadre des Nations Unies sur les changements climatiques et du protocole de Kyoto (CITEPA, 2012), en 2010, la séquestration de CO<sub>2</sub> en forêt est estimée à 150 Tg (biomasse vivante)<sup>27</sup> pour une émission estimée de 95 Tg (mortalité incluse), soit un puits net d'environ 55 Tg de CO<sub>2</sub><sup>28,29</sup>.

La quantité de carbone stockée dans la biomasse par hectare augmente, principalement du fait de la capitalisation du bois sur pied due au fait que les prélèvements actuels sont inférieurs à la production biologique.

---

<sup>21</sup> Année moyenne « 1981 » : inventaires entre 1973 et 1988.

<sup>22</sup> Année moyenne « 1993 » : inventaires entre 1985 et 1999.

<sup>23</sup> Année moyenne « 2007 » : inventaires entre 2006 et 2009.

<sup>24</sup> La production des arbres vifs est de  $86,7 \pm 2,6$  Mm<sup>3</sup>/an auquel il est nécessaire d'ajouter la production des arbres coupés ( $3,4 \pm 0,4$  Mm<sup>3</sup>/an) et celle des chablis ordinaires qui est d'une cinquantaine de milliers de mètres cubes par an.

<sup>25</sup> La part de biomasse vivante constituée par le sous-étage ligneux ou non et le feuillage n'a pu être prise en compte pour ces chiffres.

<sup>26</sup> Millions de tonnes de carbone (Mt C) = (12/44) millions de tonnes de CO<sub>2</sub> (Mt CO<sub>2</sub>).

<sup>27</sup> Concernant les réservoirs de carbone, la France considère les réservoirs biomasse vivante (aérienne et souterraine), biomasse morte et sol, mais aucune variation n'est actuellement comptabilisée pour les réservoirs sols et biomasse morte pour les terres sans changement d'utilisation.

<sup>28</sup> Tg CO<sub>2</sub>teragrammes de CO<sub>2</sub> (1Tg CO<sub>2</sub> = 1 Mt CO<sub>2</sub>).

<sup>29</sup> Avec la prise en compte des données révisées d'accroissement et de mortalité forestière et des nouvelles données fournies par l'IFN sur le prélèvement direct en forêt.

Selon une étude publiée en 1997 (Naburset *al.*, 1997), en comparaison avec nos voisins européens, le stock français est inférieur aux valeurs moyennes suisses (234 tC/ha), autrichiennes (93 tC/ha) ou allemandes (93 tC/ha). Ce stock est en revanche supérieur aux valeurs moyennes des pays méditerranéens et scandinaves (entre 20 et 40 tC/ha). Cette situation intermédiaire de la France s'explique notamment par sa position de carrefour biogéographique avec des hétérogénéités interrégionales marquées et par l'abondance de forêts âgées de moins de 60 ans.

### **Plus de carbone dans la biomasse forestière dans les forêts âgées, moins de carbone dans les taillis et de grandes disparités régionales :**

Le facteur de variation du stock de carbone par hectare ayant le rôle le plus important est l'âge des peuplements, avec des stocks variant de quelques tonnes par hectare en début du cycle sylvicole, jusqu'à plusieurs centaines en fin de révolution.

Si les résineux montrent un accroissement du stock beaucoup plus rapide que les feuillus dans les jeunes peuplements, cette différence s'amenuise à partir de 70 ans pour finalement s'inverser dans les futaies âgées (au-delà de 140 ans).

Selon Dupouey *et al.* (2002), sur la base des inventaires effectués entre 1982 et 1998, les peuplements à plus fort stock par unité de surface, en moyenne, sont les sapinières (87 tC/ha) et les hêtraies (84 tC/ha). Les plus faibles étant les peuplements de Douglas (45 tC/ha), en raison de leur jeune âge.

Les taillis-sous-futaie et les futaies régulières sont les types de formations qui stockent le plus de carbone (67 tC/ha), soit deux fois plus qu'un taillis simple (32 tC/ha). Les régions au plus fort stock de carbone à l'hectare sont au nord-est de la France (83-88 tC/ha) où les peuplements sont souvent matures et traités en futaie ou taillis-sous-futaie. *A contrario*, celles au plus faible stock se trouvent en région méditerranéenne (30-38 tC/ha), caractérisée par une part plus importante de taillis et par un milieu fortement contraignant (chaleur, sécheresse, incendies, pâturage).

### **Plus de la moitié du carbone forestier se concentre sur le sol**

Selon Dupouey *et al.* (1999), le stock de carbone dans les écosystèmes forestiers est reparti entre les compartiments biomasses et le sol de la façon suivante : 57 % sol (6 % litière et 51 % les horizons minéraux), 43 % biomasse (32 % tronc et branches, 7 % racines, 2 % feuillage, 2 % sous-étage et nécromasse).

En 1993-1994, l'analyse des sols jusqu'à 30 cm de profondeur des 540 placettes constituant la partie française du réseau systématique européen de suivi de l'état de santé des forêts a permis de calculer un stock de carbone des sols forestiers de 1140 Mt C, soit 79 t C/ha .

Le stock des horizons profonds n'est pas négligeable, surtout dans certains types de sols (podzols, sols andiques, sols isohumiques) mais varie peu à l'échelle de quelques décennies ou du siècle. Au niveau national, le stock de carbone des sols forestiers s'échelonne entre 31 et 152 t C/ha.

Enfin, autant les stocks de carbone dans les sols forestiers en France sont relativement bien connus, l'évolution de ces stocks dans le temps, par contre, reste mal appréhendée.

### **Le stock dans le sol en fonction du climat, de l'essence, du type de sol et des pratiques de gestion des sols :**

Les principaux facteurs de variation des stocks de carbone des sols forestiers sont le climat, l'essence dominante, en lien avec le type d'humus, et des caractéristiques qualitatives (type pédogénétique<sup>30</sup>) et quantitatives des sols (teneur en argile et profondeur du sol) aussi comme de certaines pratiques sylvicoles accroissant l'activité minéralisatrice des micro-organismes du sol (labour, drainage, fertilisation) et l'intensité et la gravité des incendies.

### **Incertitudes sur l'évolution quantitative du puits de carbone forestier soumis aux impacts du changement climatique :**

Le projet CARBOFOR<sup>31</sup> (Lousteau D., 2004) prévoit un changement brutal. Dans un premier temps, la production forestière augmenterait avec un maximum de production nette atteint entre 2015 et 2045. Cependant, dans un second temps, l'extension de forêts méditerranéennes peu productives, la fragilisation

---

<sup>30</sup> Pédogénétique : relatif à la formation et à l'évolution des sols.

<sup>31</sup> Le projet CARBOFOR, mené entre 2002 et 2005, étudie les impacts du changement climatique sur les forêts en termes de production, de stockage de carbone et de vulnérabilité aux maladies. Il s'agit d'un consortium de recherche rassemblant 14 partenaires et regroupant les principaux organismes de recherche français impliqués dans cette thématique : INRA, CNRS, Universités, CIRAD, Météo-France-CNRM, CEA, IFN.

des massifs forestiers par les maladies, l'augmentation probable des incendies du fait de l'augmentation des températures et des situations de sécheresses estivales laissent présager une diminution du stock de carbone.

Par ailleurs, il est important de noter que les sols forestiers, notamment ceux des anciennes forêts, sont plus pauvres que les sols agricoles comparables. Les plantations nouvelles sur d'anciennes terres agricoles, représentant la moitié de la forêt française, ont conservé un reliquat de l'enrichissement des sols agricoles préexistants, et il est donc probable que pour un grand nombre de ces sols, la fertilité ira en diminuant (Ranger *et al.*, 2003).

## 1.5 La contribution de la filière forêt bois à l'atténuation du changement climatique selon différents scénarios d'exploitation à travers d'une revue de la littérature scientifique

Cette troisième partie s'inscrit dans le débat : « Stratégie de stockage *versus* stratégie de substitution ». Nous aborderons principalement la question de l'augmentation du niveau de récolte : **est-ce qu'une intensification de l'exploitation forestière peut contribuer à atténuer le changement climatique ?** Une revue de la littérature scientifique internationale guidera notre propos.

Comme nous avons pu le décrire précédemment (Section 1.1.), le bilan GES de la filière forêt-bois doit prendre en compte différents éléments :

- a) les changements directs et indirects d'affectation des sols<sup>32</sup> ;
- b) la variation de stock de carbone dans les écosystèmes (biomasse et sol).
- c) le stockage dans les produits bois ;
- d) les émissions nettes évitées *via* les produits bois hors CO<sub>2</sub> (effet substitution matériaux) : comparaison entre les émissions du bois matériau hors CO<sub>2</sub> (exploitation de la forêt, chaîne de transformation de la filière bois matériaux et émissions d'autres GES lors de la dégradation du bois) et les émissions fossiles des matériaux énergétivores de référence (type béton, plastique, aluminium ou acier) ;
- e) les émissions nettes évitées *via* le bois énergie hors CO<sub>2</sub> (effet substitution énergétique) : comparaison entre les énergies émises dans la filière bois énergie hors CO<sub>2</sub> (exploitation de la forêt ; chaîne de production de la filière bois énergie et émissions d'autres GES lors de la dégradation ou combustion du bois) et les émissions qui auraient été émises par d'autres systèmes fossiles par unité d'énergie.

Il faut remarquer que les effets substitution matériaux et énergétique (éléments (d) et (e)) ne prennent pas en compte les émissions de CO<sub>2</sub> biogénique de la filière bois car comme nous l'avons décrit dans la Section 1.2.2, ces émissions sont comptabilisées *via* la variation de stock de carbone dans les écosystèmes.

**Les études qui ne prennent pas en compte tous ces éléments peuvent arriver à des résultats incomplets du fait de l'arbitrage entre les effets de stockage et de substitution. Tous ces éléments sont de plus interconnectés dans des échelles temporelles et spatiales complexes.**

Dans le cadre de notre analyse de la contribution de la filière forêt-bois à l'atténuation du changement climatique selon différents scénarios, nous analyserons dans un premier temps ces éléments indépendamment les uns des autres. Dans un second temps, nous procéderons à une évaluation globale de ces éléments.

---

<sup>32</sup> Ce travail est limité à l'analyse d'une intensification du prélèvement dans la forêt existante. Par conséquent, les conclusions de ce rapport ne sont pas applicables aux systèmes de production de biomasse impliquant un changement d'utilisation des terres, y compris le remplacement de la forêt existante par des taillis à courte rotation ou l'afforestation.

### 1.5.1 La variation de stock de carbone dans les écosystèmes forestiers selon le choix d'une stratégie de préservation ou d'exploitation

Une forêt jeune et en bonne santé est un puits de carbone. A mesure que la forêt vieillit, le puits de carbone diminue et la forêt finit par atteindre un état de « saturation de carbone ». Ce phénomène a conduit à considérer que la meilleure manière de lutter contre le changement climatique est d'exploiter les forêts assurant la régénération ultérieure pour « activer la pompe à carbone » ou « réactiver le puits ». Ainsi, l'hypothèse suivante est très répandue : la mise en exploitation d'une forêt ancienne contribue à augmenter la fixation de carbone atmosphérique et par conséquent contribue à l'atténuation du changement climatique. Dans cette section, nous analyserons la viabilité de cette hypothèse à partir de notre revue de la littérature.

L'échelle spatiale étant une variable clé pour l'analyse de la variation de stock de carbone dans les écosystèmes, nous analyserons tout d'abord l'échelle de la parcelle pour ensuite nous intéresser à l'échelle « paysage ».

#### 1.5.1.1 La variation de stock de carbone dans les écosystèmes forestiers à l'échelle de la parcelle

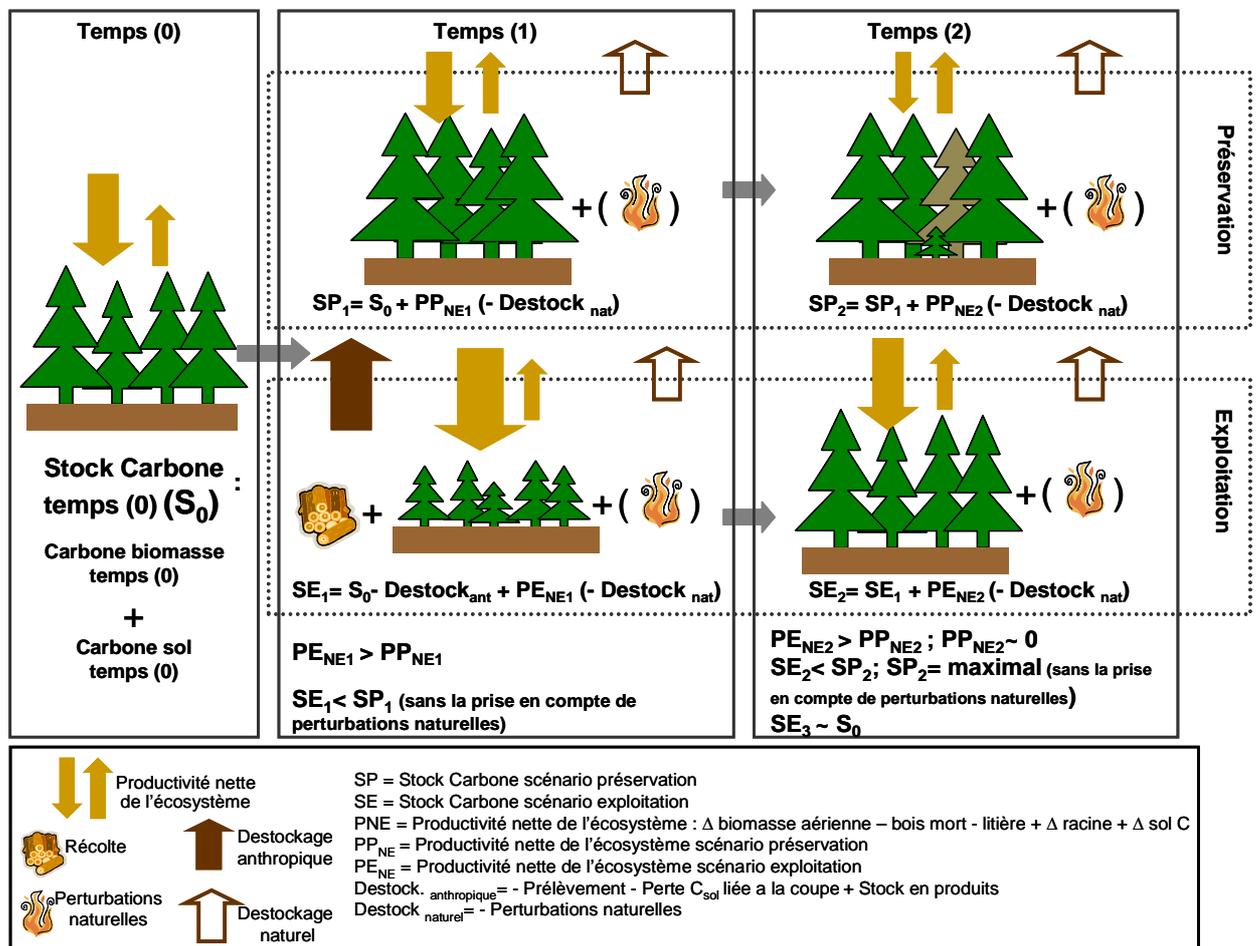


Figure 3. Cycle du carbone d'un écosystème forestier (échelle de la parcelle) avant une stratégie de préservation ou d'exploitation durable

La figure 3 décrit le cycle du carbone d'un écosystème forestier à l'échelle de la parcelle selon le choix d'une stratégie de préservation ou d'exploitation durable. La situation de départ (Temps 0) est une parcelle forestière arrivée à l'âge d'exploitabilité ; son stock de carbone est noté  $S_0$ .

**Choix d'une stratégie de préservation :**

En référence à la figure 3, nous allons maintenant aborder le choix de la préservation. Si l'on ne poursuit pas le cycle de coupe, la forêt continue à grandir et à fixer le carbone mais avec le temps, le rythme de fixation nette devient plus faible. Selon la théorie écologique, dans des conditions environnementales stables, le niveau de stock de carbone des forêts finit par atteindre un état d'équilibre (le puits net devient nul), les forêts arrivent donc à un état de « saturation » de carbone (Odum, 1969). Cette théorie a fait récemment l'objet de débats notamment liés au changement des conditions environnementales. Des études (Nabuuret *al.*, 2007 et Luysaert *et al.*, 2008) indiquent que des forêts anciennes continuent à stocker du carbone, ce phénomène peut d'ailleurs être plus important lorsque l'on prend en compte les effets du changement climatique (concentration de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère qui augmentent et l'augmentation des dépôts atmosphériques azotés). Notons aussi que, selon les conditions du territoire et les pratiques sylvicoles menées, **les forêts gérées pour la production du bois peuvent stocker une quantité de carbone inférieure à la moitié de la quantité stockée par les forêts non exploitées** (Lippke *et al.*, 2011).

Ensuite, comme les forêts gérées, **les forêts anciennes sont exposées aux risques**. Notons que des événements extrêmes comme les incendies, les parasites ravageurs ou les tempêtes violentes entraînent d'importantes pertes du stock de carbone en forêt. Les effets du changement climatique sur la forêt peuvent aggraver la fréquence et l'intensité des événements extrêmes. La structure et la composition de la forêt, peuvent également avoir des effets importants (négatifs ou positifs) sur les impacts de ces perturbations naturelles. Selon les caractéristiques du territoire et les niveaux et types des risques, des forêts très denses et/ou âgées peuvent constituer des masses moins stables face à ces aléas par rapport à aux structures maintenues dans les forêts gérées.

De plus, comme les forêts non exploitées maintiennent des niveaux de stock de carbone en forêt supérieurs à ceux produits par une gestion plus dynamique, dans le cas d'événements extrêmes, les pertes de carbone peuvent donc être plus importantes. Par exemple, **le rapport final réalisé par le European Forest Institute pour la Commission Européenne sur les impacts des tempêtes dans les forêts européennes** (Gardiner *et al.*, 2010) insiste sur le fait que : « *If the total growing stock and average age of European forests continues to increase there will be a proportional increase in the volume of storm damaged trees* »<sup>33</sup>.

### **Choix d'une stratégie d'exploitation :**

En référence à la figure 3, nous allons maintenant aborder le choix d'exploitation. **Si l'on procède à l'exploitation alors il se produit un déstockage initial en forêt et une transmission de carbone à la filière bois. Le carbone qui a été séquestré dans les arbres sera réémis dans l'atmosphère par oxydation ou combustion du bois. Dans la parcelle forestière, il y aura aussi une première phase avec des émissions de carbone du sol par minéralisation de la matière organique et de la litière. Ensuite, lors de la régénération de la parcelle, la productivité nette de l'écosystème<sup>34</sup> augmente (et donc son niveau de carbone). A l'échelle de la parcelle, l'hypothèse de travail est la suivante : la parcelle atteint un niveau de stock de carbone similaire (biomasse, bois mort, litière et sol) à son point de départ après un temps similaire à l'âge du peuplement initial (âge de coupe ou révolution forestière). D'une part, on atteint une quantité similaire au stock dans la biomasse après une révolution complète. D'autre part, en relation avec la variation de stock de carbone du sol<sup>35</sup>, certains auteurs soutiennent qu'une exploitation durable de la biomasse forestière ne conduit pas à des variations significatives du carbone du sol (Nave *et al.*, 2010 ; Gershenson *et al.*, 2011). Ainsi, de nombreuses études considèrent que le carbone du sol d'une exploitation forestière est en équilibre (le flux de carbone est égal à zéro) au bout d'un certain nombre de révolutions sans modification des pratiques sylvicoles.**

Toutefois, cette hypothèse ne prend pas en compte de possibles modifications des pratiques sylvicoles et/ou des conditions environnementales qui peuvent diminuer ou augmenter le stock de carbone des réservoirs forestiers (biomasse, bois mort, litière et sol). Nous analyserons d'abord les effets de modifications des pratiques sylvicoles pour ensuite nous intéresser au changement des conditions environnementales.

#### **a) Modifications de pratiques sylvicoles :**

- **Modification d'âge de coupe ou révolution forestière :**

<sup>33</sup> « Si le stock total et l'âge moyen des forêts européennes continuent d'augmenter, il y aura une augmentation proportionnelle du volume de chablis arbres », en français.

<sup>34</sup> Productivité Nette de l'Ecosystème (PNE) est égale à la Production Primaire Nette moins la perte de carbone par respiration hétérotrophe. Productivité Primaire Nette (PPN) : est égale à la différence entre le flux entrant du carbone dans le réservoir de la biomasse dû à la photosynthèse et la respiration autotrophe.

<sup>35</sup> Lors d'analyses du sol, les émissions de CO<sub>2</sub> doivent être étudiées. Le méthane et l'oxyde d'azote peuvent également jouer un rôle fondamental.

L'allongement de l'âge de coupe génère une augmentation du stockage de carbone en forêt. La diminution de l'âge de coupe entraîne une perte de stock. Notons que l'âge de coupe a une incidence sur la variation de stock de carbone de tous les réservoirs forestiers.

De manière générale, dans une exploitation forestière, l'âge d'exploitabilité ou la révolution forestière est choisie afin de maximiser la production annuelle moyenne en volume du bois. Cet âge d'exploitabilité est défini selon le modèle de croissance de l'espèce pour un territoire donné. Comme le montre la figure 6 afin d'atteindre ce critère, l'âge d'exploitabilité retenu est l'élément qui maximise l'accroissement moyen en volume. L'accroissement moyen en volume culmine lorsqu'il est égal à l'accroissement courant en volume. Ainsi, plus l'accroissement de l'essence est rapide, plus les révolutions sont courtes.

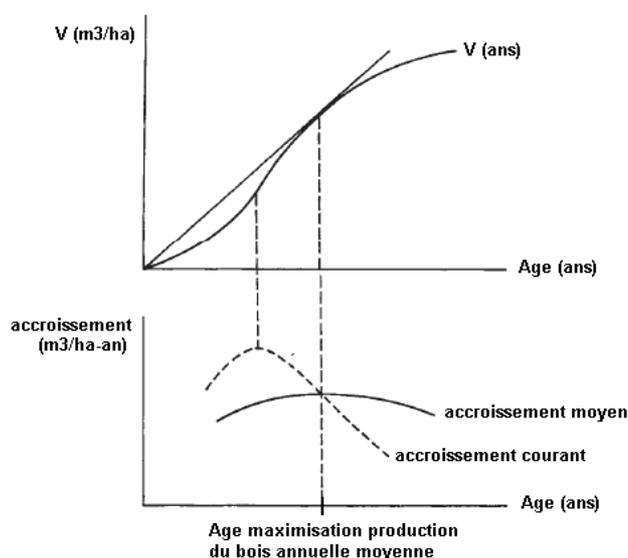


Figure 4. L'âge d'exploitabilité retenu pour une maximisation de la production du bois annuelle moyenne.  
Source : Madrigal, 1994

- **Substitution d'essences forestières :**

Chaque essence possède un modèle de croissance différent. Plus l'accroissement est rapide, plus le stockage de carbone dans la biomasse est rapide. Le niveau de stock du carbone du sol dépend également de l'essence. Cependant, il est intéressant ici de faire remarquer que la substitution des essences à croissance lente par des essences à croissance rapide ne mène pas directement à une augmentation du stock de carbone en forêt. Cela dépend fortement de l'âge d'exploitabilité choisi pour chaque espèce et de l'échelle de temps considérée.

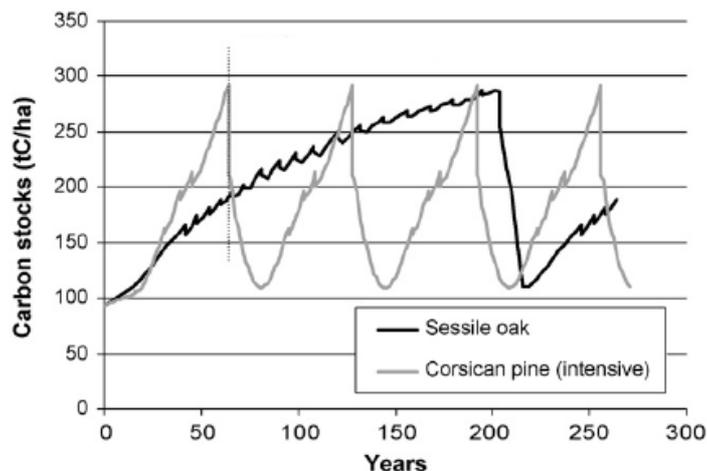


Figure 5. Évolution du stock du carbone pour le *chêne sessile* et pour le *pin laricio* après la substitution du chêne.

Nous prenons comme exemple les travaux menés par Vallet *et al.* (2009). Ces auteurs étudient la substitution du *chêne sessile* (âge de coupe 204 ans) par du *pin laricio* (âge de coupe 64 ans). Comme le montre la figure 5, cette substitution permettrait la constitution d'un puits de carbone pendant la première révolution forestière du résineux mais constituerait un stock de carbone moyen inférieur sur le long terme.

- **Modification du type de coupe de régénération**

Le choix de coupes rases et labours du sol pour préparer la plantation après l'exploitation, ou le choix de coupes progressives avec régénération naturelle jusqu'à la réalisation de coupes jardinatoires dans la recherche des structures irrégulières conduit à des variations de stock de carbone différents.

Certaines études (Bottcheret *al.*, 2007) montrent les avantages d'un point de vue carbone de la mise en place d'une sylviculture de « couverture continue » via la transformation de futaies régulières<sup>36</sup> en futaies irrégulières<sup>37</sup>. Ceci qui pourrait entraîner une plus grande complexité lors de la gestion forestière mais permet de maintenir un stock de carbone en forêt stable au niveau de la parcelle.

- **Modification de la densité de plantation et/ou régime des éclaircies**

Ces facteurs ont une incidence sur la densité et sur le modèle de croissance des essences et donc sur le stock de carbone en forêt.

- **Modification du régime de gestion**

La conversion des taillis simples en futaies ou taillis sur futaies augmente le stock de carbone en forêt (Deheza *et al.*, 2010) et *vice versa*.

- **Collecte ou non de rémanents et souches**

Si les rémanents sont laissés dans les écosystèmes alors leur décomposition émet lentement du CO<sub>2</sub> et une autre partie du carbone est séquestré dans le sol sous forme de matière organique. Johnson et Curtis (2001) montrent également une diminution moyenne de 6 % de C et de N dans le sol lorsque l'arbre entier est récolté (ce qui inclut souches et rémanents). D'autre part, des études indiquent une baisse de la production forestière liée à la baisse de fertilité du sol lorsque l'arbre entier est récolté sur la révolution d'exploitation suivante de 6 % à 32 % (Jacobson *et al.*, 2000 ; Sterba, 2003).

La baisse de fertilité des sols lorsque les rémanents ne sont pas retournés au sol (c'est à dire lorsqu'on intensifie leur prélèvement) s'explique par le fait qu'une grosse partie des éléments minéraux essentiels à la croissance de l'arbre (N, P, K, oligo-éléments, etc.) est contenue dans les rémanents. Il faut également souligner que, sauf exception, on ne fertilise pas la forêt française, et donc sur le long terme on prévoit une baisse de fertilité des sols. L'intensification des prélèvements de rémanents va donc avoir tendance à raccourcir le terme de ce phénomène (Ranger *et al.*, 2009).

<sup>36</sup>Le traitement de futaie régulière est celui qui s'efforce de maintenir ou d'obtenir une structure régulière. C'est-à-dire quand tous les arbres ont sensiblement le même âge sur la surface d'une parcelle.

<sup>37</sup>Le traitement de futaie irrégulière s'efforce de maintenir ou d'obtenir une structure irrégulière., c'est-à-dire lorsque l'on rencontre sur toute la surface d'une parcelle un mélange d'arbres de toutes les classes d'âges.

## - Fertilisation

La fertilisation a une incidence dans le modèle de croissance des essences. Cependant, lors d'une fertilisation, les émissions provenant des engrais (notamment émissions de N<sub>2</sub>O des sols) et l'utilisation accrue de combustibles fossiles (pour produire et épandre ces engrais) devront être incluses dans le calcul des incidences nettes de GES.

Enfin, notons que toute modification des pratiques a une incidence sur la structure et la composition de la forêt, et donc peuvent avoir des effets importants (négatifs ou positifs) sur les impacts des événements extrêmes.

### **b) Changement des conditions environnementales :**

L'impact du changement des conditions environnementales sur la forêt (concentration de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère qui augmentent et l'augmentation des dépôts atmosphériques azotés provenant de la combustion d'énergies fossiles dans des installations industrielles ainsi que des pratiques agricoles, modification du régime thermique et pluviométrique ainsi que la fréquence et l'intensité des événements extrêmes) peut affecter la capacité productive de la parcelle et donc le stock de carbone future.

**Pour résumer la figure 3, la variation de stock de carbone d'une parcelle préservée est positif (augmentation de son niveau de stock de carbone par rapport à la situation initiale) s'il n'y a pas de perte liée à un événement extrême, mais le rythme de séquestration de carbone dans les écosystèmes devient plus faible sur le long terme. Par contre, pour une parcelle exploitée dans sa totalité et régénérée postérieurement, sans modification des pratiques sylvicoles, il est possible d'atteindre un niveau de stock de carbone similaire à la situation de départ. Cependant, toute modification des pratiques sylvicoles (changement d'essence, modification de l'âge de coupe, récolte ou non du menu bois, etc) aurait un impact (positif ou négatif) sur l'évolution de stock de carbone des écosystèmes. Notons que cette réflexion a été menée au niveau des écosystèmes forestiers ; c'est-à-dire, sans la prise en compte de la filière bois qui sera abordée dans les sections suivantes.**

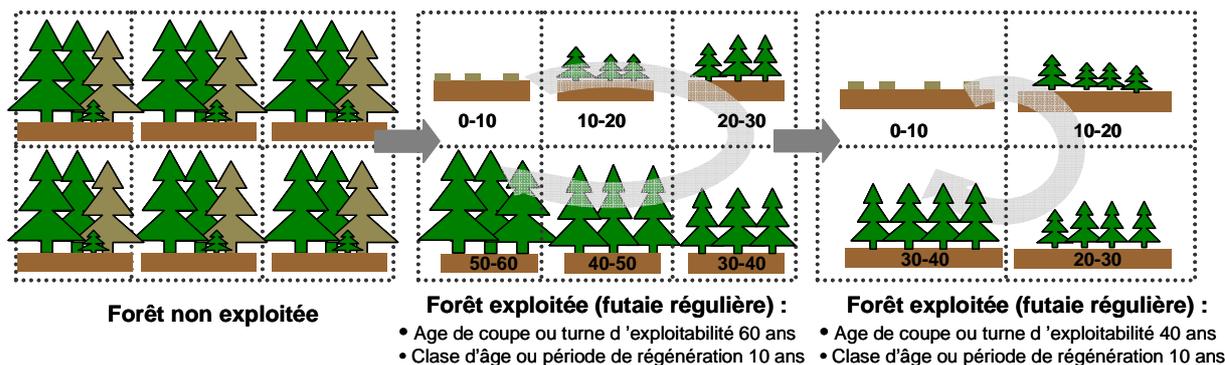
### **1.5.1.2 La variation de stock de carbone dans les écosystèmes forestiers à l'échelle « paysage »**

Nous allons maintenant étudier la variation de stock de carbone d'un écosystème forestier à l'échelle « paysage ». Dans cette étude, l'échelle « paysage » correspond à une unité de gestion forestière (massif forestier composé d'une somme de parcelles)<sup>38</sup>.

La figure 6 illustre, de façon théorique, la transformation d'un écosystème forestier non exploité en une unité de gestion forestière exploitée (futaie régulière). Dans un premier temps, cette transformation sera abordée avec un âge de coupe de 60 ans. Dans un second temps, une intensification de l'exploitation est proposée en passant à un âge de coupe de 40 ans.

---

<sup>38</sup>Dans cette section, le concept « paysage » est utilisé en recourant au sens utilisé par la littérature consultée. Une définition plus large et globale du concept « paysage » est souhaitable. Citons la définition donnée par la Convention européenne du paysage adoptée le 20 octobre 2000 : « 'Paysage' désigne une partie de territoire telle que perçue par les populations, dont le caractère résulte de l'action de facteurs naturels et/ou humains et de leurs interrelations » (Conseil de l'Europe, 2000, Chap. 1, Article 1).



Stock de carbone	(++++)	(++)	(+)
Récolte de bois	(0)	(+?*)	(+?*)

(\*) récolte moyenne annuelle de bois maximale quand les révolutions forestières se rapprochent de la maximisation de l'accroissement moyen du peuplement (variable selon essences et conditions du territoire)

**Figure 6. Transformation d'un écosystème forestier ancien non exploité en une unité de gestion forestière exploitée (âge de coupe 60 ans et 40 ans).**

Comme le montre la figure 6, **la transformation d'un écosystème forestier ancien non exploité en une unité de gestion forestière exploitée (révolution ou âge de coupe de 60 ans) entraîne une perte de carbone dans les écosystèmes** parce qu'on passe d'une superficie totale occupée par des forêts de classes d'âge élevées à une superficie où il existe des parcelles de toutes les classes d'âge en dessous de l'âge de coupe. Comme nous l'avons montré à l'échelle parcelle, le stock de carbone dans les écosystèmes des classes d'âge plus jeunes est inférieur à celui des classes d'âge plus élevées. Dans notre exemple, il faut 60 ans pour que le passage soit complet et l'exploitation régularisée. **Pendant cette période de mise en exploitation, il y a une perte de carbone dans les écosystèmes.**

**Dans une unité de gestion où l'exploitation est régularisée** afin d'obtenir une récolte annuelle durable et constante dans le temps, on prélève annuellement dans une parcelle l'accroissement accumulé dans les autres parcelles (figure 6). Dans ce cadre, **le flux net de carbone annuel devient approximativement nul et le stock de carbone devient approximativement stable** à condition, comme nous l'avons décrit précédemment, que **ne se produise pas de changement des pratiques sylvicoles ou des conditions environnementales au cours du temps.**

Comme le montre aussi la figure 6, **l'intensification de l'exploitation par une réduction de l'âge de coupe entraîne aussi un déstockage initial pendant la première révolution d'exploitation. Ultérieurement, le stock de carbone peut devenir approximativement stable mais inférieur à son point de départ.** Notons que pendant cette période de mise en exploitation, le niveau de prélèvement est supérieur à l'accroissement biologique de la forêt.

Les trois systèmes forestiers (forêt non exploitée et forêt gérée à différentes révolutions d'exploitation) génèrent un puits net dans les écosystèmes relativement faible (parce que ce sont des forêts très âgées ou parce que le niveau de récolte s'approche à l'accroissement). Cependant le stock de carbone dans les écosystèmes et la production annuelle de bois sont très différents parmi ces trois systèmes. Le système qui stocke le plus est la forêt non gérée ; le stock de carbone dans les écosystèmes diminue au fur et à mesure que les révolutions se raccourcissent. En revanche, la production annuelle du bois serait maximale quand les révolutions forestières se rapprochent de la maximisation de l'accroissement moyen du peuplement (comme décrit dans la figure 4). Notons donc que la maximisation de la production du bois commercial ne se produit pas quand le stock est maximal. Le fait d'adapter la gestion d'une forêt non ou peu gérée au maximum de production peut entraîner une perte de stock de carbone en forêt, c'est-à-dire que la forêt peut être une source de carbone.

Les conclusions que nous pouvons tirer de notre exemple sont : **dans le cas d'une gestion durable et lorsque l'exploitation est régularisée, le stock de carbone dans les forêts peut se stabiliser à un niveau fortement influencé par les pratiques sylvicoles menées (notamment la durée de la révolution forestière) mais qui reste inférieur à celui des forêts inexploitées. Pour cette raison, afin d'évaluer le bilan carbone d'un écosystème forestier, il est essentiel de considérer la situation de départ (cas**

typique des forêts guyanaises où la mise en production d'une forêt primaire ne permet jamais de retrouver le stock initial de carbone avant la première coupe).

Il est important de souligner que l'exemple théorique choisi et représenté dans la figure 5 est simplificateur. En effet, le stock de carbone dans les écosystèmes est rarement complètement stable (parce que ce sont des forêts jeunes qui sont en phase de capitalisation et qui ne sont pas exploitées au niveau maximal ou bien parce des modifications de l'intensité de la gestion forestière ou des changements des conditions environnementales se produisent au cours du temps. L'exemple précédent a uniquement pour but d'illustrer la perte ou le gain de stock *via* l'allongement ou le raccourcissement des révolutions forestières. Notons que le stock de carbone en France Métropolitaine n'est pas stable. Le stock de carbone augmente chaque année et les forêts représentent donc un puits net de carbone. Ce puits est notamment lié : i) à des afforestations qui sont encore en phase de capitalisation (reboisement qui ne sont pas arrivés à l'âge d'exploitabilité), ii) au fait que le taux d'exploitation actuel des forêts françaises est inférieur à l'optimum économique (il existe cependant de fortes différences selon les massifs forestiers et les types de propriété) ii) à l'augmentation de concentration en CO<sub>2</sub>, au changement des conditions environnementales, et aux dépôts azotés ayant eu un effet fertilisant sur les écosystèmes..

Si l'on exploite plus intensément des forêts qui sont encore un puits de carbone, le niveau de stock de carbone peut ne pas baisser par rapport à la situation de départ. Néanmoins, dans ce cas, le puits net de carbone de la forêt (séquestration de carbone en forêt) est réduit parce que les arbres qui sont coupés auraient continué à capter du carbone pendant plusieurs années s'ils n'avaient pas été abattus. La question qui peut être posée est : Qu'est-ce qui se serait passé si le niveau de prélèvement n'avait pas été augmenté ? Il y aurait eu un stock de carbone supérieur à celui obtenu avec un niveau de prélèvement augmenté. Par conséquent, il y a toujours un « coût d'opportunité » qui peut être perdu si on intensifie le niveau de récolte. A titre d'exemple, prenons l'analyse de sensibilité du calcul du niveau de référence des émissions nettes annuelles en forêt établie pour la France dans le cadre du protocole de Kyoto : le niveau de référence passe de -63 109 Mt CO<sub>2</sub>éq./an à -55 021 Mt de CO<sub>2</sub>éq./an, avec 10 % de plus de prélèvement, et à -67 549 Mt de CO<sub>2</sub> éq./an, avec 10 % de moins de prélèvement<sup>39</sup>.

L'étude réalisée par Zanchi *et al.* (2011) illustre aussi, pour un écosystème forestier de *Picea abies* dans les Alpes autrichiennes, comme une intensification du niveau de prélèvement entraîne une diminution de son rythme d'accumulation du carbone dans les écosystèmes (Figure 7 (a)) ou une perte carbone dans les écosystèmes forestiers (Figure 7 (b)).

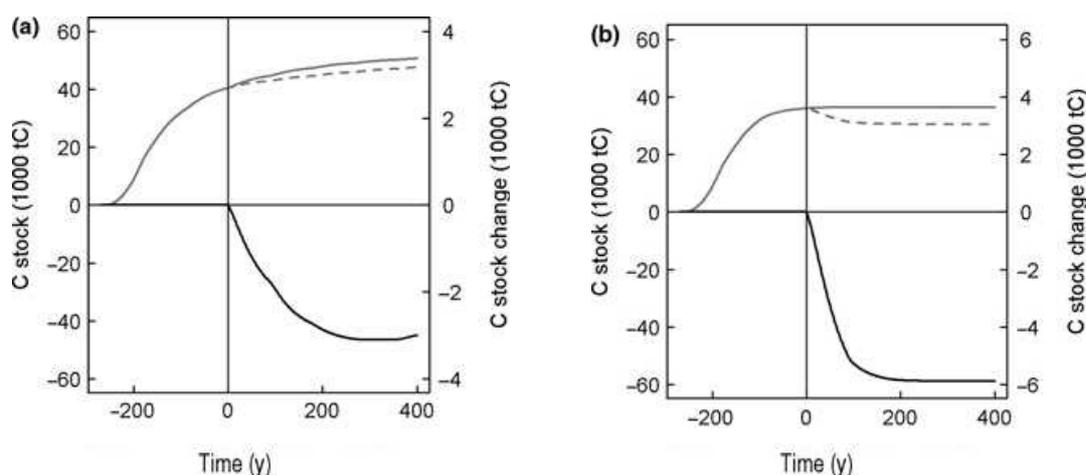


Figure 7. Effet des prélèvements supplémentaires dans le stock de carbone dans un écosystème forestier de *Picea abies* dans les Alpes autrichiennes (comprend la biomasse vivante, la litière et le sol). Dans la figure (a) Niveau de prélèvement augmente de 60% à 80% de l'accroissement biologique annuel. Dans la figure (b) le prélèvement augmente de 60% à 80% de la biomasse aérienne dans la parcelle récoltée. La différence entre le stock C dans le scénario d'intensification de prélèvement (en pointillés, ligne grise) et celui dans le scénario sans intensification (trait plein, ligne grise) est représenté par la courbe variation de stock C (ligne noire, tracée sur

<sup>39</sup> Report of the technical assessment of the forest management reference level submission of France submitted in 2011.

**l'axe secondaire-). Le point dans le temps, lorsque la gestion forestière a changé, est indiqué par l'année 0.**  
**Source : Zanchiet al., 2011**

Dans la figure 7a le niveau de prélèvement augmente de 60% à 80% de l'accroissement biologique annuel. Selon les auteurs, l'objectif est de maintenir une gestion forestière durable en prélevant toujours moins que l'accroissement biologique annuel. Dans ce système de gestion sylvicole, la récolte totale du bois diminuera avec le temps. La raison en est que si on prélève moins que l'accroissement biologique annuel, la forêt a tendance à mûrir et donc il y aurait des taux de croissance plus faibles. La figure 7a montre que sur long terme, la différence entre le stock C dans le scénario d'intensification de prélèvement (en pointillés, ligne grise) et celui dans le scénario sans intensification (trait plein, ligne grise) finit par diminuer. Ce fait est lié aux taux d'accroissement supérieur des arbres dans les scénarios d'intensification de prélèvement par rapport au scénario en l'absence d'augmentation de la récolte.

Dans la figure 7b le prélèvement augmente de 60% à 80% de la biomasse aérienne dans la parcelle récoltée. Dans ce cas, l'objectif est de maintenir une récolte du bois constante au fil du temps. Dans ce système de gestion sylvicole, dans un premier temps, le prélèvement est supérieur à l'accroissement biologique de la forêt bien qu'à un moment donné un nouvel équilibre sera atteint. Lorsque le nouvel équilibre est atteint, la différence entre les deux scénarios de gestion reste constante (Fig. 7b).

L'échelle spatiale choisie est un facteur clé pour savoir si une intensification du niveau de prélèvement entraîne une perte de carbone dans les écosystèmes forestiers ou une diminution de son rythme de séquestration nette de carbone dans les écosystèmes. A des échelles globales (départementale, régionale, voire nationale) il n'y aura pas forcément de perte de carbone dans les écosystèmes par rapport au stock initial car on prélève dans une zone la séquestration accumulée dans d'autres zones. Cependant, il est important de remarquer que l'utilisation d'une échelle globale peut dissimuler une perte de stock de carbone sur les superficies des forêts gérées. Par exemple, prenons le cas de forêts d'un territoire constituant à la fois un puits de carbone via l'existence de forêts non exploitées (innaccessibilité, réserves, forêts qui ne sont pas encore arrivées à l'âge d'exploitabilité, etc.) et à la fois des forêts existantes gérées et déjà exploitées au maximum de leur accroissement biologique. Si une intensification a lieu sur les forêts gérées, une analyse à l'échelle globale du territoire ne reflète pas forcément de perte de stock par rapport à la situation initiale. En revanche, si l'analyse est limitée à l'échelle des forêts gérées, cette intensification entraîne une perte de stock de carbone.

**En conclusion, la mise en exploitation d'une forêt ou l'intensification de son niveau de prélèvement, en absence de techniques d'augmentation de la production de la biomasse ou d'évènement extrême, peut entraîner : i) soit une perte de carbone dans les écosystèmes forestiers (ex. mise en exploitation d'une forêt ancienne non gérée) ; ii) soit une diminution de la séquestration de carbone dans les écosystèmes (puits net en forêt) et par conséquent un stock de carbone inférieur à celui qui aurait été obtenu si le niveau de prélèvement n'avait pas été augmenté (un manque à gagner de C). Le stock de carbone peut se stabiliser quand l'exploitation est régularisée à un niveau fortement influencé notamment par la durée de la révolution forestière. Cependant, toute modification de pratiques sylvicoles (changement d'essence, modification âge de coupe, récolte au non de menu bois, etc) aurait un impact (positif au négatif) sur le bilan carbone des écosystèmes. Selon les pratiques, le stock de carbone dans les écosystèmes peut continuer à diminuer atteignant un minimum lorsqu'une déforestation a lieu. Notons que le bilan GES global d'une intensification des prélèvements doit prendre en compte aussi le stockage de carbone dans les produits et les effets substitution qui vont être analysés dans les sections suivantes.**

## **1.5.2 Stock de carbone dans le produit bois-matériau**

Le bois récolté en forêt ne s'oxyde pas instantanément, il peut y avoir un stockage temporel dans les produits bois. Comme dans les écosystèmes forestiers, le stockage de carbone dans les produits atteint une limite car les produits bois ne conservent pas leur carbone éternellement.

Schlamadinger *et al.* (1996) considèrent que pour un niveau de récolte annuelle stable, pour un ratio d'utilisation de bois stable entre les différentes filières et pour une durée de vie des produits stable, il existe un équilibre entre l'oxydation des produits bois en fin de vie et la production de nouveaux produits. Par conséquent, le stockage dans les produits devient stable dans le temps et le niveau de stock de carbone obtenu à la stabilisation dépend fortement du niveau de récolte annuelle et de la durée de vie moyenne des

produits. Cependant, **générer plus de produits bois** et destiner une proportion plus importante du bois récolté à des produits de longue durée de vie permet d'augmenter le stock de carbone et donc de constituer un puits de carbone. Par conséquent, **une gestion forestière dont l'objectif est de produire plus de bois d'oeuvre à destination de la construction entraîne indirectement un stockage plus long dans la filière qu'une gestion visant à alimenter les filières de trituration et d'énergie.**

Des études réalisées en France sur le chêne montrent comment les écosystèmes forestiers représentent un pool de carbone beaucoup plus important que celui des produits du bois (les produits représente 10 % du total) et « les durées de vie moyennes des produits sont beaucoup plus courtes que ce qu'on aurait pu supposer » (Fortin M., 2011).

Dans sa thèse, Vallet (2005) calcule, pour la France, la durée de vie apparente<sup>40</sup> des produits bois répartis en cinq grandes catégories : le bois-énergie (20 mois), les papiers/cartons (26 mois), les emballages bois (3,9 ans), le bois de construction (8,5 ans) et l'ameublement (9,1 ans).

En conclusion, l'utilisation accrue des produits bois et l'allongement de leur durée de vie permettent de constituer un puits de carbone. Toutefois, à long terme, comme la production des nouveaux produits est équilibrée par l'oxydation des produits bois en fin de vie, le réservoir finit par se stabiliser.

### 1.5.3 Emissions nettes évitées par le remplacement des matériaux énergétivores hors CO<sub>2</sub> biogénique (substitution matériaux)

Le bois peut se substituer à des matériaux énergétivores, type béton, plastique, aluminium ou acier. La transformation des produits bois est généralement moins coûteuse en énergie fossile que les produits non bois substitués.

Le coefficient de substitution matériaux<sup>41</sup> (tonnes de CO<sub>2</sub> équivalent évitées par m<sup>3</sup> de bois mis dans les produits) met en relation les énergies émises dans la production du produit bois hors CO<sub>2</sub> (exploitation de la forêt, chaîne de transformation de la filière bois et émissions d'autres GES lors la dégradation du bois) et celles dans la filière bois matériaux avec les émissions qu'auraient obtenues d'autres secteurs si le produit avait été élaboré avec d'autres matériaux.

Les études menées dans le milieu des années 1990 (Schlamadinger *et al.*, 1996) montrent déjà l'importance que l'effet substitution matériaux peut avoir. Plusieurs articles publiés plus récemment, vont également dans le même sens : **l'effet substitution matériau et énergie, est cumulatif** car si les produits bois ne sont pas utilisés, il y a une émission fossile constante pour la production d'autres produits non ligneux et plus émetteurs. **L'effet substitution n'atteint pas de limite comme l'effet stockage dans les écosystèmes ou dans les produits.**

**Dans d'autres études, l'effet substitution matériaux est très variable et dépend du type d'utilisation et du produit non bois remplacé. Il varie en fonction du marché du bois et des modes de construction de chaque pays.** Par exemple, Pingoudet *et al.* (2012) compare l'effet substitution de l'utilisation du bois dans le secteur du logement en Suède et en Finlande dans le cas où le combustible fossile utilisé dans l'élaboration du produit bois est du charbon ou du gaz naturel. Les résultats sont présentés dans le tableau 1. On notera que l'intérêt du produit bois est plus grand lorsque le combustible fossile remplacé est le charbon.

---

<sup>40</sup> Le concept « durée de vie apparente » est différent de celui de « durée de vie des produits ». Exemple pour un produit avec durée de vie de 15 ans, avec 60% de la grume qui est valorisée en chutes d'une durée de vie de deux ans (énergie ou trituration), la durée de vie apparente est :  $40\% \cdot 15 + 60\% \cdot 2 = 7$  ans.

<sup>41</sup> Il faudra remarquer que le coefficient de substitution matériaux ne prend pas en compte les émissions de CO<sub>2</sub> biogénique de la filière bois parce que ces émissions sont comptabilisées à travers de la variation de stock de carbone dans les écosystèmes. Par conséquent, ce coefficient n'évalue pas le bénéfice global en termes de carbone du produit bois. Afin que l'analyse du bénéfice soit complète la variation du stock dans les écosystèmes doit être ajouté au coefficient du substitution, tout comme le stock temporel dans les produits.

**Tableau 1. kg de C fossiles évités par m<sup>2</sup> de produit bois utilisé dans le secteur du logement en Finlande et en Suède. Source : Pingoudet al. (2012)**

	Coal	Natural gas
	kg C/m <sup>2</sup> housing area/yr	
Finnish case	-1.11	-0.78
Swedish case	-0.51	-0.38

Des auteurs suggèrent aussi que l'effet substitution dépend du type de bois récolté, c'est-à-dire de l'espèce, parce que les produits générés sont différents et modifient l'effet substitution (Bottecher *et al.*, 2007).

Dans les articles analysés, les valeurs du coefficient de substitution matériaux sont très variables : de 1,31 (Pingoud *et al.*, 2012) à 0,16 (Bottecher *et al.*, 2007).

A titre d'exemple, nous donnons les facteurs d'émission issues de la base carbone ADEME pour le bois et les autres matériaux (béton, acier, aluminium, PVC) :

**Tableau 2. Facteurs d'émission issus de la base carbone ADEME pour le bois et les autres matériaux**

Matériau	Base carbone (source ADEME) facteur d'émission (kgCO <sub>2</sub> /tonne)	Masse volumique moyenne (kg/m <sup>3</sup> )	Taux d'utilisation de matières premières de recyclage ("Le recyclage en France données 2008 pour acier, aluminium et plastiques" source ADEME)	Facteur d'émission en kgCO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>	Comparaison facteurs d'émissions kg CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> du bois avec les autres matériaux
Béton	88	2 200		194	9
Béton armé	367	2 500		918	41
Acier (non recyclé)	3 190	7 800		17 546	790
Acier recyclé	1 100		45%		
PVC	1 778	1 400		2 393	108
PVC recyclé	403		5%		
Aluminium	9 827	2 700		15 216	685
Aluminium recyclé	513		45%		
Bois d'œuvre	37	600		22	

En conclusion, l'effet substitution peut être d'une grande importance dans l'analyse du bilan GES de la filière bois. En revanche, les valeurs attribuées à ce coefficient de substitution matériaux sont très différents selon les études et dépendent fortement des modes de constructions de chaque pays. Peu d'études précises sont disponibles pour le cas français.

#### 1.5.4 Emissions nettes évitées via le bois énergie hors CO<sub>2</sub> biogénique (substitution énergétique)

Les émissions nettes évitées via le bois énergie hors CO<sub>2</sub> (effet substitution énergétique) correspondent à la comparaison entre les émissions émises dans la filière bois énergie hors CO<sub>2</sub> (exploitation de la forêt et chaîne de production de la filière bois énergie et émissions d'autres GES lors de la dégradation ou de la combustion du bois) et les émissions qui auraient été émises par d'autres systèmes fossiles lors de la génération d'une quantité d'énergie identique.

Le coefficient de substitution <sup>42</sup> (tonnes de CO<sub>2</sub> équivalent évitées par m<sup>3</sup> de bois brûlé) dépend de nombreux facteurs. Le tableau suivant résume ces facteurs et propose des lignes d'actions visant à améliorer ce coefficient.

**Tableau 3. Facteurs de dépendance et actions pour améliorer le coefficient de substitution**

Facteurs de dépendance	Actions
------------------------	---------

<sup>42</sup> Remarquons que le coefficient de substitution énergétique ne prend pas en compte les émissions de CO<sub>2</sub> biogénique de la filière bois parce que ces émissions sont comptabilisées à travers de la variation de stock de carbone dans les écosystèmes. Par conséquent, ce coefficient n'évalue pas le bénéfice global en terme de carbone du produit bois énergie. Afin que l'analyse du bénéfice soit complète, la variation du stock dans les écosystèmes doit être ajouté au coefficient de substitution.

Facteurs de dépendance		Actions
1	L'intensité GES de l'énergie fossile remplacée (gaz, pétrole, renouvelables, charbon) <sup>43</sup>	Substituer des systèmes fossiles émetteurs type charbon
2	Efficiéce du produit bois énergie <sup>44</sup> (chaleur-plaquette, granulé, etc., électricité, biogaz, biocarburant, etc.)	Promouvoir des produits plus efficaces Améliorer les technologies de combustion
3	Les émissions liées à la production du produit bois énergie <sup>45</sup>	Promouvoir des produits moins émetteurs <sup>3</sup> Améliorer les technologies de production
4	Les émissions des activités humaines liées à l'exploitation et à l'entretien de la forêt	Promouvoir les techniques de collecte moins émettrices
5	La distance de transport	Favoriser les ressources locales
6	Les émissions d'autres GES en combustion	Améliorer les technologies de combustion

Par conséquent, en fonction du produit bois énergie étudié (chaleur, électricité ou biocombustibles) et des énergies fossiles substituées (gaz, pétrole ou charbon) les valeurs données dans les articles de la bibliographie sont très différentes. Pour la production d'électricité, les valeurs indicatives sont comprises entre 0,89 (charbon) et 0,50 (gaz) (Pingoudet *al.*, 2012).

**Comme l'effet de substitution matériau, Schlamandinger *et al.* (1996) montre que l'effet de substitution énergétique est cumulatif. Il n'atteint pas de limite à condition que :**

- la consommation globale d'énergie n'augmente pas dans le temps ;
- il existe une disponibilité de la ressource biomasse de façon durable.

**En conclusion, l'effet substitution énergétique peut être d'une grande importance dans l'analyse du bilan GES de la filière bois par son caractère cumulatif. Les valeurs doivent être calculées pour chaque filière bois énergie (chaleur, électricité, biocombustibles) et pour chaque pays, en fonction du mix énergétique substitué.**

### 1.5.5 Evaluation globale du bilan GES de la forêt et de la filière bois selon différents scénarios d'exploitation

Afin de mener une évaluation globale du bilan GES de la forêt et de la filière bois selon différents scénarios d'exploitation, une revue de la littérature scientifique internationale a été effectuée. Nous avons différencié, dans une première partie, les conclusions des premiers auteurs ayant travaillé sur ce sujet, dans le milieu des années 1990. Dans une seconde partie, **nous avons sélectionné 10 études de cas de la littérature récente qui évaluent le bilan GES de la globalité de la filière forêt-bois** selon différents scénarios d'exploitation et de distribution de la récolte entre les différentes filières (bois d'œuvre, bois d'industrie et bois énergie).

#### 1.5.5.1 Analyse basée sur une revue de la première littérature qui évalue le sujet

Schlamandinger B., Marland S. et Marland G. sont parmi les premiers auteurs à avoir travaillé sur ce sujet. Dans le milieu des années 1990, ils publient une série d'articles (Marland S. et Marland G., 1992 ; Marland G. et Schlamandinger B., 1995 ; Marland G. et Schlamandinger, 1997 ; Schlamandinger et Marland G. 1996a et 1996b) afin d'apporter des réponses à la question : l'intensification de l'exploitation forestière peut-elle contribuer à atténuer le changement climatique ? Certains éléments méthodologiques et certains résultats de leurs travaux ont été utilisés par d'autres chercheurs dans les années 2000 et continuent à être utilisés aujourd'hui. Schlamandinger et Marland ont notamment construit un modèle théorique nommé GORCAM à

<sup>43</sup> Le mix énergétique en France est moins GES - intense que dans les autres pays européens. Mix énergétique du secteur du logement en 2008 : 40 % d'électricité (dont 80 % nucléaire), 40 % de gaz naturel et de charbon, 20 % de pétrole et d'autres gaz. Il faut noter que le mix énergétique du secteur de l'électricité est encore moins GES – intense car liée à la proportion importante de l'énergie nucléaire et hydraulique : 74 % nucléaire, 12 % hydraulique, 11 % thermique et 2,7 % autres (éolien, photovoltaïque et autres renouvelables).

<sup>44</sup> Quantité de bois nécessaire par unité d'énergie produite. Ce facteur devient encore plus important avec l'obligation de comptabilisation du carbone biogénique.

<sup>45</sup> Les produits qui émettent plus dans le processus de production sont ceux qui ont une plus grande efficacité énergétique. Par conséquent, les facteurs 2 et 3 devraient être étudiés conjointement.

partir de données représentatives pour la forêt tempérée. GORCAM est composé de quatre sous modèles : la biomasse, le sol, le stock en produit et l'effet substitution.

Dans leur publication « *The role of forest and bioenergy strategies in the global carbon cycle* » (Schlamadinger et Marland, 1996a) le bilan CO<sub>2</sub> résultant de la mise en exploitation d'une forêt **tempérée** mûre est traité (figure 8 et 9) . La situation de départ est donc une forêt mûre avec un stock de carbone dans la biomasse de 150 MgC/ha. La situation finale est une forêt gérée à des révolutions de 60 ans avec un stock de carbone dans la biomasse de 100 Mg C/ha auquel on ajoute le stockage de carbone dans les produits et les effets substitution matériaux et énergétique.

Dans un première temps, ils nous montrent (figure 8) la variation de stock de carbone à l'échelle d'une parcelle d'un hectare de forêt mûre qui est coupée (coupe rase) et régénérée ultérieurement. Cette parcelle serait coupée une deuxième fois quand elle atteint 60 ans. Nous allons analyser l'évolution des différents réservoirs de carbone :

- Stock de carbone en forêt : après la première coupe, le stock de carbone en forêt (« trees », « litter », « soil », dans la figure 8) baisse à -165 MgC/ha (150 MgC/ha de la biomasse, plus les pertes de stock de carbone du sol). La régénération de cette parcelle fait que le stock de carbone se récupère dans le temps mais il ne retrouve pas le stock initial parce que la deuxième coupe est réalisée à 60 ans quand le stock dans la biomasse est de 100 MgC/ha.
- Stock de carbone dans les produits : le carbone stocké dans le bois coupé n'oxyde pas instantanément, il y a un stockage temporel dans les produits bois dépendant fortement de la durée de vie du produit (« short-lived products » et « long live products », dans la figure 8). Dans l'exemple, ce stockage est inférieur au stock de carbone dans la biomasse coupée liées aux pertes d'exploitation et transformation.
- Effets substitution matériaux et énergétique : Dans l'exemple, les effets substitution ne compensent pas la perte de stock de carbone en forêt dans la première révolution. En revanche, ces effets s'accumulent pour chaque période de coupe. **Par conséquent, ces effets compensent (séquestration nette de carbone = 0) dans le temps (deuxième révolution) la perte de carbone dans les écosystèmes.** Les auteurs montrent que si le bois est utilisé avec une efficacité maximale, la compensation pourrait être attendue du début (« high efficiency »).

Dans un deuxième temps, les auteurs nous montrent l'évolution des différents réservoirs carbone de la mise en exploitation d'une forêt tempérée mûre **à l'échelle d'une unité de gestion de 100 ha (figure 9). La situation de départ est** 100 ha de forêt mûre avec un stock de carbone 150 MgC/ha. La situation finale est 100 ha de forêt gérée (période de rotation 60 ans) avec un stock de carbone 100 MgC/ha, la superficie de coupe annuelle est de 1.66 ha (1/60 x 100 ha).

- Stock de carbone en forêt : **La figure montre une perte initiale de stock de carbone en forêt de 16 434 MgC : 273,9 MgC (1,66 ha x 165 MgC/ha) chaque année jusqu'à l'année 60 ( 273,9 MgC x 60 ans ).** Cette perte est compensée par la séquestration de carbone de la régénération des parcelles qui au bout de 60 ans est de 5 000 MgC (1,66 ha de chaque classe d'âge en dessous de 60 ans). **Une fois que l'exploitation est régularisée (à partir de 60 ans dans l'exemple), le flux de carbone annuel devient nul et le stock de carbone devient stable, mais à un niveau inférieur néanmoins à la situation de départ (forêt non gérée de 150 ans d'âge).**
- Stock carbone dans les produits bois : **Le stock de carbone dans les produits bois devient également stable une fois que l'exploitation est régularisée (récolte annuelle stable). On observe un équilibre entre l'oxydation des produits bois et la production de nouveaux produits.**
- **les effets substitution matériaux et énergie : les effets substitution matériaux et énergie s'accumulent pour chaque période de coupe. Par conséquent, ces effets peuvent compenser dans le temps la perte de carbone dans les écosystèmes.** Dans l'exemple proposé, cette compensation se produit à environ 100 ans. **L'article souligne que cette temporalité est très variable en fonction des conditions du territoire et des valeurs du coefficient de substitution matériaux (type de produit substitué selon les modes de construction) et du coefficient de substitution énergétique (type de combustible fossile substitué combiné à l'efficacité du produit bois énergie). Pour cette raison, un système d'efficacité élevé dans la filière bois énergie associé à une substitution de matériaux fortement consommatrice d'énergie pourrait permettre d'obtenir une compensation dans un délai beaucoup plus court.**

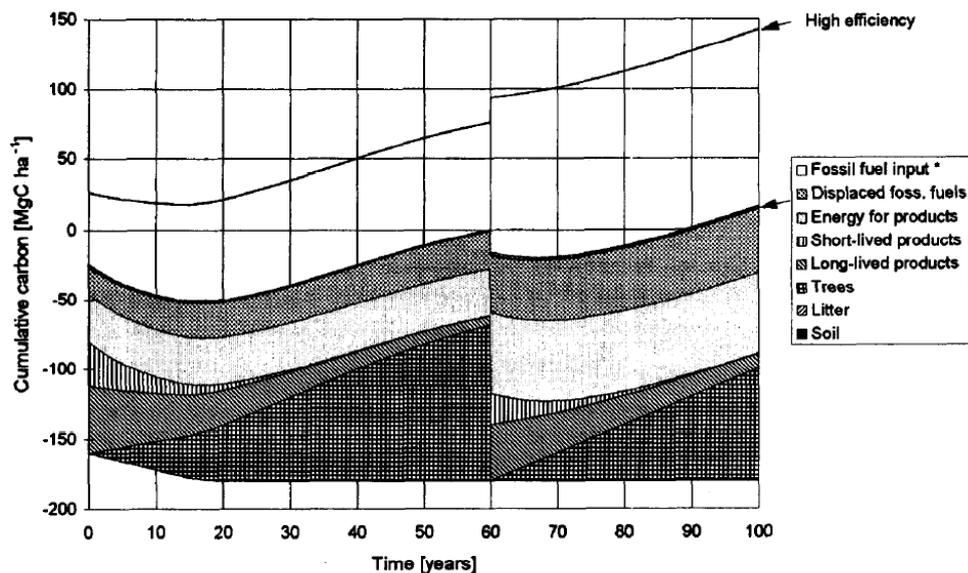


Figure 8 . Séquestration nette de carbone liée à la mise en exploitation d'une forêt mûre à l'échelle de la parcelle (comprend la variation de stock en forêt, le stock dans les produits et les effets de substitution matériau et énergie). Situation de départ : 1 ha de forêt mûre avec un stock de carbone 150 MgC/ha. Situation finale : 1 ha de forêt gérée (âge de coupe 60 ans) avec un stock de carbone de carbone 100 Mg C/ha. Source : Schlamadinger B et Marland G., 1996

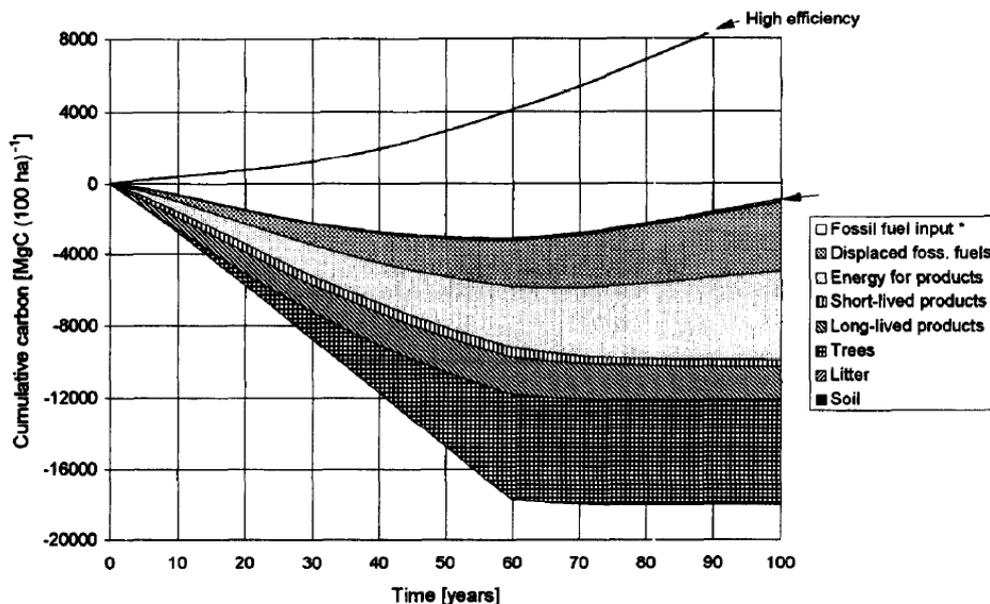


Figure 9. Séquestration nette de carbone liée à la mise en exploitation d'une forêt mûre à l'échelle de l'unité de gestion (comprend la variation de stock en forêt, le stock dans les produits et les effets de substitution matériau et énergie) Situation de départ : 100 ha de forêt mûre avec un stock de carbone 150 MgC/ha. Situation finale : 100 ha de forêt gérée (période de rotation 60 ans), superficie de coupe annuelle (1/60) x 100 ha. Source : Schlamadinger B et Marland G., 1996

Par ailleurs, cet article étudie également l'effet obtenu par la non-exploitation d'une forêt exploitée régulièrement à 60 ans, Figure 10 (échelle de la parcelle). La situation de départ est 1 ha de forêt de 60 ans avec un stock de carbone dans la biomasse de 100 MgC/ha.

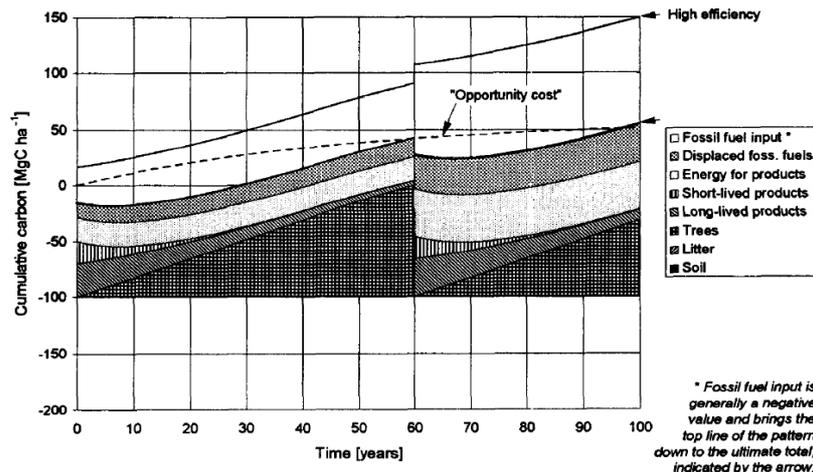


Figure 10 . Séquestration nette de carbone dans une parcelle de 1 ha de forêt exploitée (âge de coupe 60 ans) en comparaison avec la décision de ne pas poursuivre son cycle de coupe (nommé « opportunity cost »). Comprend la variation de stock en forêt, le stock dans les produits et les effets de substitution matériau et énergie. Source : Schlamadinger B et Marland G., 1996

Sans exploitation, la forêt pourrait accumuler plus de stock de carbone dans les écosystèmes (en pointillés dans la figure 10) jusqu'à atteindre un stock de 150 Mg C/ha. L'article appelle cette perte d'opportunité d'augmenter le stock de carbone en forêt « coût d'opportunité ». En revanche, si on « poursuit l'exploitation », la forêt est donc coupée et régénérée, on obtient un stock de carbone temporel dans les produits et des effets substitution.

Par conséquent, quand ce « coût d'opportunité » est inférieur au bénéfice apporté par le stockage temporel dans les produits et les effets substitution, le scénario « poursuivre l'exploitation » apporte plus d'avantages. Dans l'exemple utilisé dans l'article, cette compensation est attendue à 95 ans.

**L'article conclut en soulignant que même si les stocks de carbone en forêt (biomasse, sols, litière) et dans les produits sont importants, ils atteignent un niveau maximal. En revanche les effets substitutions sont cumulatifs. Ainsi, à plus long terme, les avantages sont plus importants dans les scénarios d'intensification de l'exploitation, dans le cadre d'une gestion durable.**

Marland et Marland (1992) suggèrent que pour des forêts avec une grande quantité de biomasse sur pied et une faible productivité, la stratégie la plus efficace est de protéger la forêt existante. Pour des forêts avec une faible quantité de biomasse sur pied et une faible productivité, la stratégie la plus efficace consiste à reboiser ou à gérer la forêt pour accroître le stockage C dans les écosystèmes. Par contre, dans les zones où l'on peut s'attendre à une productivité élevée, la stratégie la plus efficace consiste à gérer la forêt pour une récolte durable et à utiliser le bois avec une efficacité maximale, soit avec des produits de longue durée de vie ou par le remplacement de combustibles fossiles très émetteurs.

### 1.5.5.2 Analyse basée sur une revue de la littérature récente

Dans la littérature plus récente, plusieurs articles abordent ce débat. L'échelle spatiale est très variable : on recense des études à l'échelle nationale (Werner *et al.* 2010 pour la Suisse, Lecoq *et al.*, 2011 pour la France), à l'échelle régionale (Chandra Poudel *et al.*, 2011 et Erickson *et al.*, 2007 pour la Suède centrale ; Hudiburg *et al.*, 2011 pour l'ouest des États-Unis ; Botcher *et al.*, 2007 pour Thuringia en Allemagne) ou à l'échelle de l'unité de gestion (Seidl *et al.*, 2007, Carinthie en Autriche ou Jong *et al.*, 2007 dans le nord du Mexique, Pingoud *et al.*, 2010 dans une forêt théorique en Finlande).

Plusieurs modèles ont été développés et utilisés dans ces études en incluant les paramètres spécifiques à chaque pays ou région ou unité de gestion. Il est possible de différencier les modèles appliqués à l'échelle de l'unité de gestion de ceux appliqués à l'échelle régionale ou nationale :

Par exemple, pour l'échelle de l'unité de gestion : FORNICA (Botcher *et al.*, 2007), CO2FIX (Jong *et al.*, 2007), PICUS et TRACE (Seidl *et al.*, 2007) et pour l'échelle régionale ou nationale : MAXIMO et YASO ; French Forest Model (Lecoq *et al.*, 2011); BIOMASS, HUGIN et Q-model (Chandra Poudel *et al.*, 2011).

Il est possible de différencier des modèles forestiers empiriques et mécanistes. Les premiers peuvent être utilisés que pour un horizon de temps très limité (10-20 ans) alors que les seconds peuvent être utilisés pour des estimations à long terme.

Les horizons de temps utilisés dans les analyses sont très variables selon les articles. Cet élément est à rapprocher avec le type de modèle utilisé. Lecoq *et al.* (2011), horizons de temps de 10 ans ; Hudiburg *et al.*, (2011) 20 ans, Botcher *et al.* (2007) 40 ans, Jong *et al.* (2007) 90 ans ; Werner *et al.* (2010), Chandra Poudel *et al.* (2011) et Seidl *et al.* (2007) 100 ans ; et Erickson *et al.* (2007) 250 ans.

Il faut noter que la plupart des auteurs ne prennent pas en compte tous les éléments qui pourraient avoir un impact sur le bilan :

1. Pingoud *et al.* (2010) et Lecoq *et al.* (2011) ne prennent pas en compte la variation de stock de carbone dans le sol.
2. Seuls Chandra Poudel *et al.* (2011) prennent en compte l'effet du changement climatique sur la forêt.
3. Seuls Hudiburg *et al.* (2011) prennent en compte le fait que les écosystèmes peuvent répondre à des risques d'événement extrêmes selon les différents scénarios sylvicoles.
4. Seidl *et al.* (2007) ne prennent pas en compte les émissions fossiles dans la chaîne de transformation de la filière bois.
5. Seuls Chandra Poudel *et al.* (2011) prennent en compte les émissions fossiles liées à la gestion forestière
6. Aucune étude n'analyse l'effet d'une diminution du niveau du prélèvement au niveau national, associée à une augmentation de la demande du bois (intensification de l'exploitation forestière en dehors du territoire national ou augmentation du taux de déforestation). Werner *et al.* (2010) alerte quant à l'importance que cet effet peut avoir mais les auteurs n'incluent pas une analyse systématique de ce facteur dans leur étude.

Dans toutes ces études, le bilan des différents scénarios de gestion sylvicole (qui génèrent eux-mêmes différents niveaux de récolte) ont été comparés avec un scénario de référence « *business as usual* ».

Selon l'article, différents itinéraires sylvicoles peuvent être étudiés. Les scénarios sylvicoles comprennent généralement :

- Scénario de l'augmentation de la récolte.
  - Diminution de l'âge de coupe (Botcher *et al.*, 2007 ; Erickson *et al.*, 2007)
  - Maximisation du niveau de prélèvement : le prélèvement est égal ou légèrement inférieur à l'accroissement (Werner *et al.*, 2010)
  - Augmentation du régime des éclaircies : réduction de la superficie terrière (Hudiburg *et al.*, 2011 ; Erickson *et al.*, 2007)
  - Collecte de rémanents (Jong *et al.*, 2007 et Chandra Poudel *et al.*, 2011, Erickson *et al.*, 2007)
  - Méthodes d'augmentation de la productivité (fertilisation, substitution d'espèce par d'autres plus productives, amélioration génétique, etc.) (Chandra Poudel *et al.*, 2011 ; Erickson *et al.*, 2007)
- Scénarios de diminution de la récolte annuelle :
  - Allongement d'âge de coupe (Botcher *et al.*, 2007)
  - Augmentation de la superficie de réserve (Chandra Poudel *et al.*, 2011)
  - Réduction générale du niveau de prélèvement (Werner *et al.*, 2010)
  - Préservation intégrale de la superficie étudiée (Seidl *et al.*, 2007 ; Botcher *et al.*, 2007)
  - Diminution du régime des éclaircies : augmentation de la superficie terrière (Hudiburg *et al.*, 2011 ; Erickson *et al.*, 2007 ; Jong *et al.*, 2007)
- Scénarios qui n'affectent pas le niveau de la récolte annuelle :
  - Régime de couverture continue (Botcher *et al.*, 2007 ; Seidl *et al.*, 2007)

Nous analyserons tout d'abord les résultats du bilan carbone au niveau des écosystèmes forestiers et, dans un second temps, nous évaluerons les effets de stockage dans les produits et les effets de substitution pour rendre possible une évaluation globale.

Dans le cadre d'une analyse du bilan carbone dans les écosystèmes forestiers, comme l'indique l'article de Seidl *et al.* (2007), différentes méthodes de comptabilisation sont applicables. Les plus utilisées sont les approches en flux (« flow approche ») et les approches en « stocks moyens » (« **mean storage approach** »). Tandis que dans la première approche, les absorptions et les émissions annuelles dans les écosystèmes sont mesurées, la deuxième approche **considère que le bilan des absorptions et émissions est égal à la variation de stock de carbone dans les écosystèmes**. L'approche la plus utilisée dans les articles analysés est l'approche en « stocks moyens ».

**Les résultats des études montrent comment, en l'absence de méthodes d'augmentation de la productivité, l'accumulation de carbone ou le stock de carbone dans les écosystèmes forestiers est plus élevée dans les scénarios de diminution de la récolte annuelle.** C'est-à-dire qu'un stock de carbone final plus élevé que le stock initial est la conséquence d'une variation de stock plus avantageux (Seidl *et al.*, 2007 ; Pingoud *et al.*, 2010 ; Werner *et al.*, 2010 ; Erickson *et al.*, 2007 ; Lecocq *et al.*, 2011).

A titre d'exemple, nous montrons les résultats sur l'évolution des stocks de carbone au niveau des écosystèmes forestiers de l'étude de Werner *et al.* (2010) pour la Suisse. Dans cette étude les bilans GES de 4 scénarios (tableau 3) ont été comparés.

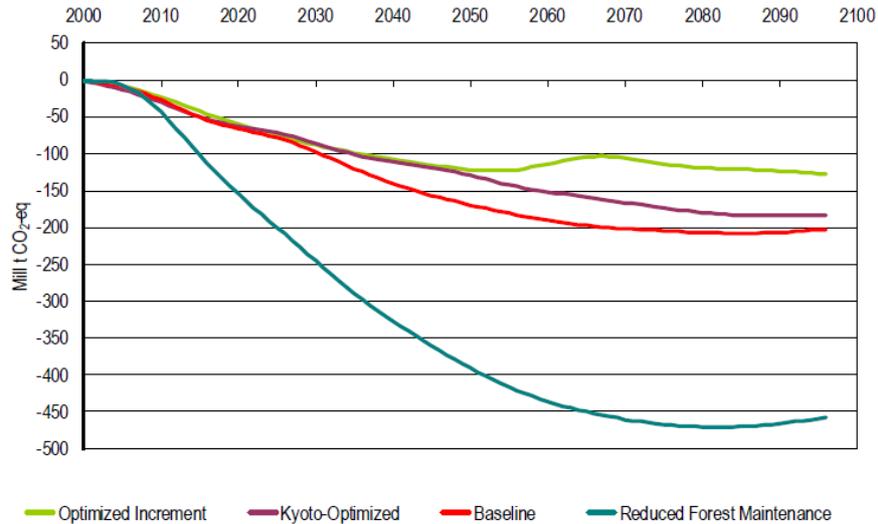
**Tableau 4. Scénarios de prélèvement et utilisation du bois dans la forêt et filière bois suisse**

Scénarios	Prélèvement annuel <sup>1</sup>	Utilisation du bois
<b>Année de référence : 2000</b>	Prélèvement 5,4 M m <sup>3</sup> /an import 1,4 M m <sup>3</sup> , export 2,2 M m <sup>3</sup>	65 % bois construction / 35 % bois énergie
<b>accroissement optimisé</b> « construction »	+ 70 % prélèvement	61 % bois construction / 39 % bois énergie
<b>accroissement optimisé</b> « énergie »	+ 70 % prélèvement	30 % bois construction / 70 % bois énergie
<b>optimisation Prot. Kyoto</b>	récolte bois telle que puits C augmente dans la forêt jusqu'au « cap » du Prot. Kyoto : + 60 % prélèvement	68 % bois construction / 70 % bois énergie
<b>« business as usual »</b>	+ 10 % prélèvement	65 % bois construction / 35 % bois énergie
<b>réduction de l'exploitation forestière</b>	- 45 % prélèvement	87 % bois construction / 13 % bois énergie

<sup>1</sup>import/export constant

Comme le montre la figure 11, en tenant compte uniquement des stocks de carbone des écosystèmes forestiers (biomasse et sol), le scénario de « réduction de l'exploitation forestière » produit clairement les meilleurs résultats. Les valeurs les moins bonnes correspondent au scénario « accroissement optimisé ».

Il est toutefois important de noter que vers 2080, le niveau de stock de carbone dans les écosystèmes se stabilise ; le scénario « réduction de l'exploitation forestière » ne fournit alors plus de bénéfices et peut même générer une certaine perte liée à des risques d'événements extrêmes. La structure d'âge défavorable et l'important volume sur pied de ce scénario peut favoriser le risque accru d'effondrement des peuplements - suite à des tempêtes, des périodes de sécheresse ou à des attaques d'insectes.



**Figure 11. Accumulation de carbone dans les écosystèmes forestiers dans les différents scénarios dans la forêt suisse. Source : Werner *et al.* (2010)**

Botcher *et al.* (2007) et Seidl *et al.* (2007) montrent comment différentes stratégies de gestion qui n'affectent pas le niveau de récolte, peuvent entraîner différents niveaux de stockage du carbone dans la forêt, soulignant dans ce cas les bénéfices du « régime de couverture continue ».

Nous allons analyser maintenant l'ensemble de la filière bois.

Dans un premier temps, si l'on ajoute le stock dans les produits bois à la variation de stock dans les écosystèmes, les avantages des scénarios de diminution de la récolte annuelle s'amenuisent, mais ils présentent encore les meilleurs résultats. Les bénéfices des scénarios d'augmentation de la récolte sont obtenus en ajoutant les effets substitution matériaux et énergie et selon les horizons de temps considérés.

Comme le montrent les sections précédentes, **l'effet de stockage dans les écosystèmes et dans les produits atteint une limite (état de « saturation ») et en menant une exploitation durable de la forêt, le niveau de carbone peut se stabiliser dans les écosystèmes forestiers, mais à un niveau inférieur au niveau attendu si le taux de récolte n'avait pas augmenté. En revanche, les effets substitution s'accumulent au fil du temps.**

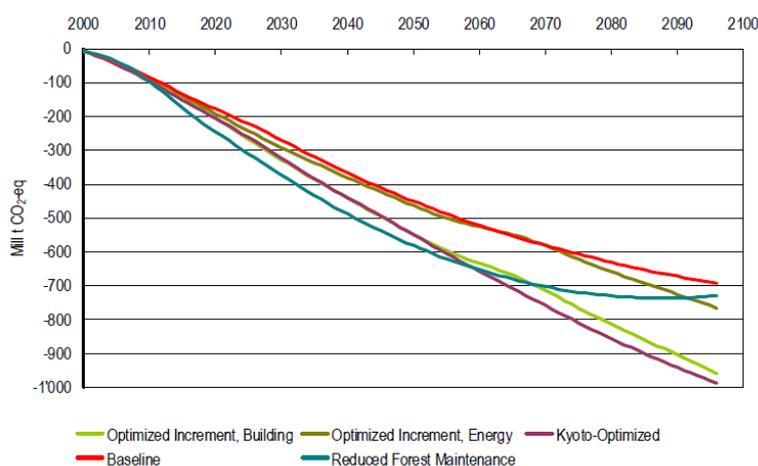
Par conséquent, le bénéfice global des scénarios d'intensification, en ajoutant tous les facteurs (substitution et stockage), dépend de l'horizon de temps considéré. Il est donc nécessaire de déterminer à partir de quel moment l'effet de substitution compense le « coût d'opportunité », le stockage de carbone supplémentaire dans les écosystèmes qui aurait eu lieu si le niveau de prélèvement n'avait pas été augmenté.

Les auteurs qui prennent en compte un horizon de temps court et, n'utilisent pas les techniques d'augmentation de la production, ne trouvent pas de bénéfices dans le bilan GES pour les scénarios d'augmentation du niveau du prélèvement par rapport au scénario de référence « business as usual » (Lecoqc *et al.*, 2011 pour le cas de la France métropolitaine, Hudiburg *et al.*, 2011<sup>46</sup>). Il faut noter que dans ces articles, le niveau de prélèvement des scénarios « augmentation du niveau du prélèvement » est égal ou inférieur à l'accroissement. C'est-à-dire que, même si l'augmentation du prélèvement reste en-dessous de l'accroissement, il n'y a pas de bénéfices dans un premier temps.

Les auteurs qui évaluent le bilan à un horizon de temps plus long (Werner *et al.*, 2010, Botcher *et al.*, 2007), trouvent des bénéfices à moyen ou long terme (entre 40 et 100 ans). D'autres auteurs (Erikson *et al.*, 2007) n'indiquent pas à quel moment les bénéfices commencent à avoir lieu, mais, pour la période de 250 ans considérée, ils constatent que des bénéfices moyens annuels supérieurs sont supérieurs. Dans l'étude conduite par Seidl *et al.* (2007) pour un horizon de temps de 100 ans le scénario « préservation intégrale » continue à être le plus avantageux, mais ces auteurs considèrent ce scénario comme une « référence biologique » plutôt que comme une réelle alternative.

<sup>46</sup> Hudiburg *et al.*, 2011 montrent que le bilan GES des scénarios d'augmentation du niveau du prélèvement ne sont pas bons pour 80 % de la superficie étudiée.

A titre d'exemple, nous montrons les résultats du bilan GES de la globalité de la filière forêt-bois de l'étude de Werner *et al.* (2010) pour la Suisse. Comme le montre la figure 12, si l'on ajoute le stock dans les produits du bois et les effets de substitution matériau et énergie à la variation du stock dans les écosystèmes, les résultats changent drastiquement. À court terme, c'est le scénario « réduction de l'exploitation forestière » qui permet de fixer la plus grande quantité de carbone, mais à moyen et, particulièrement, à long terme, les scénarios où les prélèvements sont les plus élevés présentent les effets les plus avantageux sur l'amélioration du bilan CO<sub>2</sub>.



**Figure 12 . Accumulation des émissions nettes de CO<sub>2</sub>eq liées à la gestion de la forêt et la filière bois dans les différents scénarios pour la forêt suisse (comprend la variation de stock en forêt, le stock dans les produits et les effets de substitution matériau et énergie)Source : Werner *et al.* (2010)**

Il faut noter que même si l'augmentation du prélèvement reste inférieure à l'accroissement, il peut ne pas y avoir de bénéfices dans un premier temps. C'est-à-dire que l'application de ces scénarios peuvent conduire à une augmentation des émissions par rapport au scénario « *business as usual* » à court terme.

D'autre part, les auteurs (Hudiburget *al.*, 2011) qui prennent en compte le fait que les écosystèmes peuvent répondre à des risques d'événement extrêmes de différentes façons selon les différents scénarios sylvicoles, concluent que la stratégie optimale ne sera pas la même pour tous les écorégions.

Chandra Poudel *et al.* (2011) montrent comment en utilisant différentes techniques d'augmentation de la production (amélioration du matériel génétique, scarification des sols, remplacement par espèces plus productives et fertilisation), il est possible de récolter une quantité de bois supérieure et, à la fois, d'augmenter le stock de carbone dans les écosystèmes. Par conséquent, ces scénarios produisent des bénéfices dès le départ.

Quelques auteurs évaluent différents scénarios de l'utilisation du bois afin d'évaluer quelle stratégie de l'utilisation du bois est la plus avantageuse : scénarios qui favorisent le bois de construction ou ceux qui augmentent le volume du bois utilisé pour le bois énergie (Seidl *et al.*, 2007, Werner *et al.* 2010 ; Erickson *et al.*, 2007).

**Werner *et al.* (2010) et Erickson *et al.* (2007) suggèrent que les scénarios qui favorisent l'utilisation du bois matériau présentent des effets plus avantageux que ceux mettant l'accent sur l'emploi du bois à des fins énergétiques.** Ces scénarios génèrent un stock en produit plus élevé et l'effet de substitution matériau est ajouté. **Ainsi, les produits en fin de vie peuvent être utilisés dans la filière bois énergie. Pour cette raison, ces auteurs encouragent l'utilisation en cascade du bois (d'abord sous forme de matériau, puis comme source d'énergie en fin de vie).**

En revanche, Seidl *et al.* (2007) promeut l'augmentation du volume du bois utilisé pour le bois énergie, mais il faut noter que, dans leur analyse, l'effet substitution matériaux n'est pas pris en compte.

D'autres auteurs (Pingoud *et al.*, 2010) suggèrent que la distribution du bois entre les filières dépend de la qualité et de la dimension du bois. Ils montrent comment l'allongement des révolutions dans les futaies régulières mène à la production de bois de dimensions plus élevées qui permettent d'augmenter le ratio bois d'œuvre (construction et ameublement) par rapport au bois de trituration (papier/carton) et bois-énergie. **Dans**

cette étude, l'allongement de l'âge de coupe mène à la fois à une augmentation du stockage dans les écosystèmes, dans les produits et a un effet de substitution matériaux plus important, même si le niveau de récolte annuelle est inférieur. Par conséquent, ces auteurs la considèrent comme une stratégie gagnante-gagnante.

## 1.5.6 D'autres considérations entre la forêt et le climat

### 1.5.6.1 Indicateurs de la mesure d'impact sur le climat : potentiel de réchauffement global (GWP), forçage radiatif

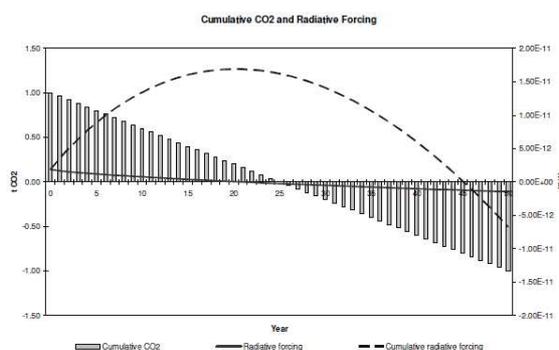
Comme discuté ci-dessus, une augmentation du niveau de prélèvement peut conduire à une augmentation temporaire des émissions de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère, ce qui provoque un impact sur le réchauffement climatique.

Pour évaluer l'impact dans le temps de cette augmentation temporaire des émissions de CO<sub>2</sub>, il faut tenir compte de sa durée de vie dans l'atmosphère. C'est ce que fait le Potentiel de réchauffement mondial<sup>47</sup> (GWP)<sup>48</sup>.

Actuellement, le GWP<sub>100</sub> est couramment utilisé pour évaluer les impacts sur le changement climatique mais d'autres indicateurs peuvent être utilisés, par exemple : le forçage radiatif<sup>49</sup>, ou le forçage radiatif cumulatif.

Certains auteurs (Bird *et al.*, 2009, Cherubini *et al.*, 2011; Pingoud *et al.*, 2012) soulignent l'importance de l'utilisation de ces indicateurs afin de mieux évaluer l'impact sur le climat d'une augmentation du niveau de prélèvement en forêt notamment pour des fins énergétiques. Ces auteurs remarquent que l'utilisation de ces indicateurs par rapport à l'utilisation d'indicateur « *cumulative carbone émissions* » conduit à ce que les scénarios d'augmentation du niveau de prélèvement génèrent des bénéfices dans des périodes de temps plus longs.

Bird *et al.*, 2009 montrent (figure 13) comment un scénario d'augmentation du niveau de récolte pour l'énergie qui commence à avoir une réduction des émissions de CO<sub>2</sub> après 25 ans, n'atteint pas une forçage radiatif cumulatif négatif (« *cumulative radiative forcing* », en anglais) qu'après 45 ans.



**Figure 13. Cumulative CO<sub>2</sub> émissions et cumulative radiative forcing d'un scénario d'augmentation du niveau de récolte pour l'énergie. Source : Bird *et al.*, 2009**

<sup>47</sup>Potentiel de réchauffement mondial (GWP) : Indice, décrivant les caractéristiques de radiation de gaz à effet de serre bien mélangés, représentant l'effet combiné de la durée de vie de ces gaz dans l'atmosphère et leur efficacité relative pour absorber le rayonnement infrarouge sortant. Cet indice donne l'approximation de l'effet de réchauffement dans le temps d'une masse unitaire d'un gaz à effet de serre donné dans l'atmosphère, par rapport à celui du dioxyde de carbone. (FAO, 2009).

<sup>48</sup>GWP, par son abréviation en anglais (Global Warming Potential).

<sup>49</sup> Le forçage radiatif (Radiative forcing, en anglais) est le changement de l'exposition énergétique verticale nette (exprimée en Wm<sup>-2</sup>) à la tropopause dû à un changement interne ou à un changement du forçage externe du système climatique (changement de la concentration de dioxyde de carbone ou du rayonnement solaire, par exemple). En général, le forçage radiatif est calculé en tenant compte du réajustement des températures stratosphériques à l'équilibre radiatif, mais avec toutes les propriétés troposphériques maintenues à leurs valeurs non modifiées.

### 1.5.6.2 Effets biophysiques des forêts sur le climat

Divers auteurs (Anderson *et al.*, 2011) remarquent aussi que plusieurs paramètres biophysiques propres à la forêt ont des impacts sur le climat régional et donc, potentiellement, sur l'atténuation du changement climatique. Ces autres effets sur le climat sont l'albédo et les transferts de chaleur, notamment, *via* l'évapotranspiration.

Le premier paramètre est notamment important dans des zones de hautes latitudes (hémisphère nord). En effet, la neige possède un albédo élevé et réduit la quantité d'énergie absorbée à la surface. Les prairies et les cultures dans ces zones ont des albédos d'environ 0,6 lorsqu'ils sont recouverts de neige en hiver, tandis que les forêts ont des albédos plus faibles car leurs canopées plus sombres obscurcissent la neige tombée au sol et absorbent les radiations.

Le deuxième facteur est notamment important dans les forêts tropicales. La forêt tropicale a un effet refroidissant au niveau régional car elle a un taux élevé d'évapotranspiration qui contribue à la formation des nuages de basses altitudes. Ce phénomène réduit non seulement la température de surface de l'écosystème mais aussi la lumière atteignant la surface du sol.

A cause de ces effets biophysiques, les feuillus à feuillage caduc pourraient être plus efficaces pour le refroidissement que les conifères à feuillage persistant pour certaines latitudes car en été (au moment où la radiation solaire est à son maximum) leur albédo est très faible (0 à 0,1) et que leur taux d'évapotranspiration est bien plus élevé.

## 1.6 Conclusion

Afin d'évaluer si une intensification de l'exploitation forestière peut contribuer à atténuer le changement climatique, il est fondamental de définir les limites des implications de la filière forêt-bois dans le cycle global du carbone. Le bilan GES de la filière forêt-bois doit prendre en compte différents éléments :

- a) les changements directs et indirects d'affectation des sols<sup>50</sup> ;
- b) le bilan CO<sub>2</sub> au sein des écosystèmes forestiers (biomasse et sol) : le bilan entre la photosynthèse, la respiration autotrophe et hétérotrophe et les perturbations naturelles et anthropiques. Ce bilan peut être estimé en comptabilisant la variation de stock de carbone dans les écosystèmes ;
- c) le stockage dans les produits bois ;
- d) les émissions nettes évitées *via* les produits bois hors CO<sub>2</sub> (effet substitution matériaux) : comparaison entre les émissions du bois matériau hors CO<sub>2</sub> (exploitation de la forêt, chaîne de transformation de la filière bois matériaux et émissions d'autres GES lors de la dégradation du bois) et les émissions fossiles des matériaux énergétivores de référence (type béton, plastique, aluminium ou acier).
- e) les émissions nettes évitées *via* le bois énergie hors CO<sub>2</sub> (effet substitution énergétique) : comparaison entre les énergies émises dans la filière bois énergie hors CO<sub>2</sub> (exploitation de la forêt ; chaîne de production de la filière bois énergie et émissions d'autres GES lors de la dégradation ou combustion du bois) et les émissions qui auraient été émises par d'autres systèmes fossiles par unité d'énergie.

Tous ces éléments sont de plus interconnectés dans de complexes échelles temporelles et spatiales. Les études qui ne prennent pas en compte tous ces éléments peuvent arriver à des résultats incomplets du fait de l'arbitrage entre les effets de stockage et de substitution.

D'une part, **la mise en exploitation d'une forêt ou l'intensification de son niveau de prélèvement entraîne:**

- a) **dans tous le cas** (même si le prélèvement est inférieur au taux d'accroissement) , sauf si :
  - des techniques d'augmentation de la production de la biomasse sont utilisées (amélioration du matériel génétique, scarification des sols, remplacement par espèces plus productives et fertilisation) qui n'entraînent pas un déstockage du carbone du sol;

---

<sup>50</sup> Ce travail est limité à l'analyse d'une intensification du prélèvement dans la forêt existante. Par conséquent, les conclusions de ce rapport ne sont pas applicables aux systèmes de production de biomasse impliquant un changement d'utilisation des terres, y compris le remplacement de la forêt existante par des taillis à courte rotation ou l'afforestation.

- l'impact, en cas d'évènement extrême, est plus important que si la coupe n'avait pas été réalisée,

**un stock de carbone inférieur à celui qui aurait été obtenu si le niveau de prélèvement n'avait pas été augmenté. Par conséquent, un « coût d'opportunité » est perdu s'il y a une intensification du niveau de récolte.**

- b) dans certains cas, une perte de carbone dans les écosystèmes forestiers par rapport à la situation de départ. La condition pour que cette perte ne se produise pas tient à la réunion de ces facteurs : i) le prélèvement doit être inférieur au taux d'accroissement (en considérant uniquement que la superficie de la forêt gérée) ; ii) il ne doit pas y avoir de diminution de la capacité productive ; iii) il ne doit pas y avoir de perte de carbone du sol ; iv) il ne doit pas y avoir de perte liée à un évènement extrême.

D'autre part, l'augmentation du niveau de prélèvement peut générer plus de produits bois, ce qui entraîne :

- **Un stock de carbone dans les produit bois plus élevé ;**
- **Une augmentation des émissions nettes fossiles évitées via le bois énergie ou par remplacement des matériaux énergétivores. Ces effets substitution matériaux et substitution énergétique sont cumulatifs** car si les produits bois ne sont pas utilisés il y a une émission fossile constante pour la production d'autres produits non ligneux ou pour la production d'énergies à travers d'autres systèmes fossiles. **L'effet substitution n'atteint pas de limite comme l'effet stockage dans les écosystèmes ou dans les produits.**

**Par conséquent, le bénéfice global des scénarios d'intensification, en ajoutant tous les facteurs (substitution et stockage), dépend de l'horizon de temps considéré. Il est donc nécessaire de déterminer à partir de quel moment l'effet de substitution et l'effet stockage dans les produits bois compensent la perte de carbone dans les écosystèmes ou le « coût d'opportunité » (le stockage de carbone supplémentaire dans les écosystèmes qui aurait eu lieu si le niveau de prélèvement n'avait pas été augmenté).**

Il faut noter **que même si l'augmentation du prélèvement reste inférieure à l'accroissement, il peut ne pas y avoir de bénéfices dans un premier temps dans les scénarios présentés dans les études de cas analysées<sup>51</sup>. C'est-à-dire que l'application de ces scénarios peuvent conduire à une augmentation des émissions par rapport au scénario « business as usual » à court terme. La temporalité à laquelle les scénarios d'intensification commencent à générer des bénéfices est très variable selon les conditions du territoire (productivité, type de sol, risques d'évènement extrême, etc.), le type de gestion forestière (niveau de prélèvement, type de coupe, utilisation de techniques d'augmentation de la production, etc.), distribution entre les différents usages du bois et des valeurs du coefficient de substitution énergétique (type de combustible fossile substitué combiné à l'efficacité du produit bois énergie) et les valeurs du coefficient de substitution matériaux (l'intensité GES du type de produit substitué combiné à l'intensité GES du produit bois).**

Notons que certains auteurs soulignent que pour conduire une évaluation de l'impact dans le temps de cette augmentation temporaire des émissions de CO<sub>2</sub>, il est nécessaire de tenir compte de sa durée de vie dans l'atmosphère. Ces auteurs suggèrent l'utilisation d'indicateurs comme le potentiel de réchauffement mondial<sup>52</sup>(GWP)<sup>53</sup> afin de mieux évaluer l'impact de ces émissions sur le climat. **L'utilisation de ces indicateurs conduit généralement à ce que les scénarios d'augmentation du niveau de prélèvement génèrent des bénéfices dans des périodes de temps plus longues. Par ailleurs, d'autres auteurs soulignent que les évaluations ne prenant pas en compte les effets biophysiques des forêts sur le**

<sup>51</sup> Notons que les auteurs (Hudiburg *et al.*, 2011) considérant que les écosystèmes peuvent répondre à des risques d'évènement extrêmes de différentes façons selon les différents scénarios sylvicoles, concluent que la stratégie optimale ne sera pas la même pour toutes les écorégions. Cet article démontre qu'à un horizon de 20 ans, les scénarios d'augmentation du niveau de prélèvement apportent de bénéfices dans 20 % de la superficie étudiée. Chandra Poudel *et al.* (2011) montrent comment en utilisant différentes techniques d'augmentation de la production, il est possible de récolter une quantité de bois supérieure et, dans le même temps, d'augmenter le stock de carbone dans les écosystèmes. Par conséquent, ces scénarios produisent des bénéfices dès le départ.

<sup>52</sup>Potentiel de réchauffement mondial (GWP) : Indice, décrivant les caractéristiques de radiation de gaz à effet de serre bien mélangés, représentant l'effet combiné de la durée de vie de ces gaz dans l'atmosphère et leur efficacité relative pour absorber le rayonnement infrarouge sortant. Cet indice donne l'approximation de l'effet de réchauffement dans le temps d'une masse unitaire d'un gaz à effet de serre donné dans l'atmosphère, par rapport à celui du dioxyde de carbone. (FAO, 2009).

<sup>53</sup>GWP, par son abréviation en anglais (Global Warming Potential).

**climat (notamment l'albedo et les transferts de chaleur via l'évapotranspiration) peuvent également conduire à des résultats incomplets.**

Pour la complexité de l'analyse et du fait de cette forte interrelation avec les paramètres spécifiques du territoire et de la filière bois, **les résultats de ces études provenant d'une revue de la bibliographie internationale doivent être considérés comme des valeurs indicatives et des analyses spécifiques pour chaque région de France métropolitaine doivent être conduites afin d'être en possession de plus d'éléments qui permettront de répondre à ces questions : Comment optimiser la contribution de la forêt française métropolitaine et ses filières bois matériau et bois énergie à l'atténuation du changement climatique ? Quel équilibre trouver entre la séquestration du carbone dans les écosystèmes et la substitution au profit des matériaux économes en énergie et des énergies renouvelables issues du bois ?**

## **Bibliographie**

ADEME, 2011. Rapport final du groupe de travail carbone biogénique. Document non publié.

Anderson R.G., Canadell J.G., Randerson J.T., Jackson R.B., Hungate B.A., Baldocchi D.D., Ban-Weiss G.A., Bonan G.B., Caldeira K., Cao L., Diffenbaugh N.S., Gurney K.R., Kueppers L.M., Law B.E., Luysaert S., O'Halloran T.L., 2011. Biophysical considerations in forestry for climate protection. *Front Ecol. Environ.*, 9(3), pp. 174–182.

Bishnu Chandra P., Sathre R., Bergh J., Gustavsson L., Lundstrom A. et Hyvonen R., 2012. Potential effects of intensive forestry on biomass production and total carbon balance in north-central Sweden. *Environmental Science and Policy*, 15 (1), pp. 106-124.

Bottcher H., Freibauer A., Obersteiner M. et Schulze E., 2008. Uncertainty analysis of climate change mitigation options in the forestry sector using a generic carbon budget model. *Ecological Modelling*, 213 (1), pp. 45-62.

Brais S., Camire C., Bergeron Y. et Pare D., 2002. Changes in nutrient availability and forest floor characteristics in relation to stand age and forest composition in the southern part of the boreal forest of northwestern Quebec. *Forest Ecology and Management*, 76, pp. 181–189.

Cauria S., 2012. Modélisation de la filière forêt-bois française: Évaluation des impacts des politiques climatiques. Thèse de doctorat, AgroParisTech.

CITEPA, 2012. Rapport national d'inventaire pour la France au titre de la convention cadre des nations unies sur les changements climatiques et du protocole de kyoto. format CCNUCC.1362 p.

Conseil de l'Europe, 2000, *Convention Européenne du Paysage*, Florence, 20 octobre 2000, (Accessible sur : <http://conventions.coe.int/treaty/fr/Treaties/Html/176.htm>).

Dupouays J.L., Pignard G., Badeau V., Thimonier A., Dhôte J.F., Nepveu G., Bergès L., Augusto L., Belkacem S., Nys C., 2002. Stocks et flux de carbone dans les forêts françaises. *Forêt Wallonne*, 57, pp. 7-19.

Eriksson E., Gillespie A. R., Gustavsson L., Langvall O., Olsson M., Sathre R. and Stendahl J., 2007. Integrated carbon analysis of forest management practices and wood substitution. *Canadian journal of forest research*, 37, pp. 671-681

FAO, 2010. Evaluation des ressources forestières mondiales 2010. FAO Forestry paper 163.

Fortin M., Ningre F. et Robert N., 2011. Le carbone et les futaies de chêne : Quelle gestion adopter ?. Colloque REGEFOR, 16 juin 2011.

Guehl J., Géraud Chabriat G. et Mollier P., 2011. La forêt française face au changement climatique. *INRA Magazine* 17.

Groenigen K. J., Osenberg C. W. et Hungate B.A., 2011. Increased soil emissions of potent greenhouse gases under increased atmospheric CO<sub>2</sub>. *Nature* 475, pp. 214-216.

Hudiburg T.W., Law B.E., Wirth C. et Luysaert S., 2011. Regional carbon dioxide implications of forest bioenergy production. *Nature Climate Change*, 1, pp. 419-423.

- Inventaire Forestier Nationale (IFN), 2005. La forêt française : un puits de carbone ? Son rôle dans la limitation des changements climatiques. *L'IF*, n° 7.
- Inventaire Forestier Nationale (IFN), 2011a. Volume de bois sur pied dans les forêts françaises :650 millions de mètres cubes supplémentaires en un quart de siècle. *L'IF*, n° 27.
- Inventaire Forestier Nationale (IFN), 2011b. Prélèvements de bois en forêt et production biologique : des estimations directes et compatibles. *L'IF*, n° 28.
- IPCC, 2006. Guidelines for national greenhouse gas inventories. Volume 4 :Agriculture, forestry and other land use.
- IPCC, 2007a. *The Physical Science Basis*. In: Metz, B., et al. (Eds.), *Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the IPCC*, Cambridge University Press, Cambridge.
- IPCC, 2007b. Mitigation. In: Metz, B., et al. (Eds.), Working Group III of the Fourth assessment Report. *Intergovernmental Panel on Climate Change*, University Press, Cambridge.
- Jong B. H., Masera O., Olguin M. et Martinez R., 2007. Greenhouse gas mitigation potential of combining forest management and bioenergy substitution: A case study from Central Highlands of Michoacan, Mexico. *Forest Ecology and Management*, 242, pp. 398–411
- Gardiner B., Blennow K., Carnus J-M, Fleischer P., Ingemarson F., Landmann G., Lindner M., Marzano M., Nicolli B., Orazio C., Peyron J-L., Reviron M-P., Schelhaas M-J., Schuck A., Spielmann M., et Usbeck T., 2010. Destructive Storms in European Forests: Past and Forthcoming Impacts. *Final Report to EC DG Environment*. <http://ec.europa.eu/environment/forests/fprotection.htm>.
- Jacobson S., Kukkola M., Malkonen E. et Tveite B., 2000. Impact of whole-tree harvesting and compensatory fertilization on growth of coniferous thinning stands. *Forest Ecology Management*, 129, pp. 41–51.
- Johnson D.W. et Curtis P.S., 2001. Effects of forest management on soil C and N storage: meta analysis. *Forest Ecology and Management*, 140, pp. 227-238.
- Lecocq F., Caurla S., Delacote P., Barkaoui A. et Sauquet A., 2011. Paying for forest carbon or stimulating fuelwood demand? Insights from the French Forest Sector Model. *Journal of Forest Economics*, 17 (2), pp. 157-168.
- Lindner, M., Maroschek, M., Netherer, S., Kremer, A., Barbati, A., Garcia-Gonzalo, J., Seidl, R., Delzon, S., Corona, P., Kolström, M., Lexer, M.J. et Marchetti, M., 2010. Climate change impacts, adaptive capacity, and vulnerability of European forest systems. *Forest Ecology and Management*, 259, pp. 698-709.
- Lippke B., Oneil E., Harrison R., Skog K., Gustavsson L. et Sathre R., 2011. Life cycle impacts of forest management and wood utilization on carbon mitigation: knows and unknowns. *Carbon management*, 2 (3), pp. 303-333
- Lousteau D. (coord.), 2004 (juin). CARBOFOR. Séquestration de carbone dans les grands ecosystems forestiers en France. Quantification, spatialisation, vulnérabilité et impacts de différents scénarios climatiques et sylvicoles. Rapport final, programme GICC 2001, convention GIP ECOFOR n°3/2001, 138 p.
- Luyssaert S., Schulze E. D., Börner A., Knohl A., Hessenmöller D., Law B. E., Ciais P. et Grace J., 2008. Old-growth forests as global carbon sinks. *Nature*, 455, pp. 213–215.
- Marland G. et Marland S., 1992. Should we store carbon in trees? In: Wisniewski J, Lugo AE, editors. Water, air, and soil pollution, 64 (1–2). Special Issue "Natural sinks of CO<sub>2</sub>"; 1992. pp. 181–95.
- Marland G. and Schlamadinger B. 1995. Biomass Fuels and Forest-Management Strategies: How Do We Calculate the Greenhouse-Gas Emissions Benefits? *Energy*, 20, pp. 1131-1140.
- Marland B, Schlamadinger B., 1997. Forests for carbon sequestration of fossil fuel substitution? A sensitivity analysis. *Biomass Bioenergy*, 13(6), pp. 389–97.
- Nabuurs G.J., Päivinen R., Sikkema R. et Mohren G.M.J., 1997. The role of European forests in the global carbon cycle – a review. – *Biomass and Bioenergy*, 13 (6), pp. 345-358.

Nave L. E., Vance E., Swanston C. et Curtis P., 2010. Harvest impacts on soil carbon storage in temperate forests. *Forest Ecology and Management*, 259, pp. 857–866.

Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation, de la Pêche, de la Ruralité et de l'Aménagement du territoire (MAAPRA), 2010. Les Indicateurs de gestion durable des forêts françaises métropolitaines, édition 2010, 200 p.

Odum, 1969. The strategy of ecosystem development. *Science*, 164, pp. 262-270.

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

Pingoud K., Ekholm T., et Savolainen I., 2012. Global warming potential factors and warming payback time as climate indicators of forest biomass use. *Mitigation Adaptation Strategies for Global Change*, 17, pp. 369–386.

Ranger J., Nys C., 2003. La qualité des sols forestiers français. *Étude et Gestion des Sols*, 10 (4), pp. 263-285.

Ranger J., Dambrine E., Nicolas M., Landmann G., 2009. Chapitre 10 « Impacts de prélèvements accrus de biomasse sur les sols forestiers ». In : « Bio2 Biomasse et Biodiversité forestière. Augmentation de l'utilisation de la biomasse forestière : implications pour la biodiversité et les ressources naturelles », Landmann G., Gosselin F., Bonhême I. (coord.), Paris. *GIP ECOFOR*, 211 p.

Schlamadinger B. et Marland G., 1996. The role of forest and bioenergy strategies in the global carbon cycle. *Biomass and Bioenergy*, 10 (5-6), pp. 275-300.

Schlamadinger B. et Marland G., 1996b. Full Fuel-Cycle Carbon Balances of Bioenergy and Forestry Options. *Energy Conservation and Management*, 37, pp. 813-818.

Seidl R., Rammer W., Jager D., Currie W. et Lexer M., 2007. Assessing trade-offs between carbon sequestration and timber production within a framework of multi-purpose forestry in Austria. *Forest Ecology and Management*, 248 (1-2), pp. 64-79.

Vallet, P., 2005. Impact de différentes stratégies sylvicoles sur la fonction « puits de carbone » des peuplements forestiers. Thèse de doctorat, ENGREF, co-financée par l'ADEME.

Werner F., Taverna R., Hofer P., Thurig E. et Kaufmann E., 2010. National and global greenhouse gas dynamics of different forest management and wood use scenarios: a model-based assessment. *Environmental Science and Policy*, 13 (1), pp. 72-85.

# Partie 2 : Impact sur le Changement Climatique de l'intensification des prélèvements de bois en forêt métropolitaine pour l'énergie

---

## Sommaire

1.1	Définition des émissions du carbone biogénique dans la filière bois énergie et hypothèses de neutralité .....	51
1.2	Limites des hypothèses de la neutralité du carbone biogénique .....	52
1.6	Le bénéfice du bilan CO2 de la filière bois énergie avec la prise en compte du carbone biogénique à travers d'une revue de la littérature scientifique .....	53
1.6.1	Dans la filière bois énergie provenant de la collecte des rémanents .....	56
1.6.2	Dans la filière bois énergie provenant de récoltes additionnelles du bois dans la forêt existante .....	57
1.7	Conclusions .....	62
	Bibliographie .....	63

## Partie 2 : Impact sur le Changement Climatique de l'intensification des prélèvements de bois en forêt métropolitaine pour l'énergie

Comme nous l'avons écrit en introduction, suite au Grenelle de l'environnement des objectifs ambitieux de production d'énergies renouvelables à partir de la biomasse ont été fixés à l'horizon 2020. Le Plan d'Action National en faveur des Energies Renouvelables 2009-2020 prévoit une augmentation de la mobilisation de la ressource sylvicole de +3 à +5,4 Mtep en 2020.

Sur la base d'une revue de la littérature scientifique, dans cette deuxième partie, nous allons nous concentrer sur l'effet sur le climat d'une intensification du niveau du prélèvement de bois en forêt pour des fins énergétiques ; cette intensification du niveau de prélèvement étant soit due à la collecte des rémanents qui étaient auparavant laissés dans les écosystèmes, soit à l'augmentation du niveau de récolte du bois. **Notons que l'intensification du prélèvement uniquement pour l'énergie ne reflète pas un positionnement souhaitable. L'intensification des prélèvements doit être menée conjointement pour l'énergie et le bois d'œuvre selon la chaîne de valorisation du bois décrit dans la section 1.1 de la partie 1.** Cette partie de notre travail pose donc un postulat simplificateur car, de façon générale, le bois supplémentaire récolté lors d'une intensification du niveau de prélèvement en forêt n'est pas totalement utilisé à des fins énergétiques. Selon la dimension et la qualité des arbres récoltés, une partie de la récolte est utilisée pour le bois matériaux et une autre partie pour le bois énergie. Nous voulons souligner que pour évaluer l'impact de la filière bois énergie sur le climat de façon plus rigoureuse, il est nécessaire dans, un premier temps, de définir les méthodes des allocations des impacts entre les différentes filières bois.

Ce travail est limité à l'analyse du bénéfice en terme de CO<sub>2</sub> de la filière bois énergie dont la ressource bois provient d'une intensification du prélèvement dans la forêt existante. Par conséquent, les conclusions de ce deuxième chapitre ne sont pas applicables à une filière basée sur du bois provenant d'autres origines comme : i) le bois provenant de déchets de l'industrie du bois matériaux ou des produits bois en fin de vie ; ii) le bois provenant de nouvelles plantations ; iii) ou encore le bois provenant d'arbres situés en dehors de la forêt (ex : haies ou arbres de ville).

Un autre élément important à souligner réside dans le fait que la mise en place d'une filière bois énergie ne conduit pas nécessairement à une augmentation du niveau de récolte, et cela même si la filière est alimentée par du bois provenant de la forêt existante. Une augmentation de la demande et du prix du bois énergie, par exemple, peut conduire à ce que bois destiné jusqu'alors à d'autres usages (comme le bois de trituration destiné à la fabrication de la pâte de papier) soit utilisé pour l'énergie. Dans ce cas, il n'y a pas nécessairement une augmentation du niveau de récolte mais plutôt une substitution de l'usage du bois. Dans ce cas de figure, pour évaluer le bénéfice en terme de GES, le bilan GES des deux usages du bois doit être comparé : d'un côté, l'effet de substitution énergétique dans la solution bois énergie et, de l'autre, l'effet stockage dans les produits et l'effet substitution matériaux dans la solution bois matériaux. Un autre facteur à prendre en compte dans cette évaluation est l'importation du bois. Une augmentation de la demande et du prix du bois énergie au niveau national peut conduire à une augmentation du taux d'importation du bois de trituration destiné à la fabrication de la pâte de papier.

En première approximation, dans ce travail, il a été décidé d'analyser l'impact sur le climat de la mise en place d'une filière bois énergie alimentée avec du bois provenant de récoltes supplémentaires dans la forêt existante. La récolte supplémentaire est imputée entièrement à la filière bois énergie et le bois ne provient que de la récolte supplémentaire de la forêt existante. Des études qui prennent en compte : i) le bois provenant des autres origines, ii) des allocations de l'intensification du prélèvement entre les différentes filières, iii) la compétition entre les différents usages du bois, doivent être menées.

Notre objectif dans cette deuxième partie sera de présenter les résultats d'évaluation d'impacts sur le climat de la mise en place d'une filière bois énergie alimentée par du bois provenant de récoltes supplémentaires dans la forêt existante. La récolte supplémentaire est ici entièrement imputée à la filière bois énergie et le bois ne provient que de la récolte supplémentaire de la forêt existante.

Cette partie est basée sur une **analyse approfondie de huit articles scientifiques** (Cherubini *et al.*; 2011 ; Domke *et al.* 2012 ; BiomassEnergy Resource Center, 2012 ; Lindholme *et al.*, 2011 ; Mckechnie *et al.*, 2011 ; Sathre *et al.*, 2011 ; Walker *et al.*, 2010 ; Zanchiet *et al.*, 2011). Ces articles sont **des études de cas qui évaluent le bilan GES** de récoltes supplémentaires pour l'énergie afin de connaître le bénéfice en terme de

CO<sub>2</sub> de la mise en place d'une filière bois énergie. Ces études de cas sont localisées dans des écosystèmes forestiers possédant des conditions similaires à ceux de la France métropolitaine.

Avant conduire l'analyse de ces études de cas (Section 2.4.), cette partie propose une brève description des hypothèses de la neutralité du carbone biogénique (Section 2.2.) ainsi que ses limites (Section 2.3.).

## 1.1 Définition des émissions du carbone biogénique dans la filière bois énergie et hypothèses de neutralité

Dans ce travail, les émissions de CO<sub>2</sub> biogéniques sont définies comme les émissions de CO<sub>2</sub> résultant de l'oxydation (y compris combustion) du bois dans la filière bois énergie.

Jusqu'à ces dernières années, les méthodes de type empreinte de carbone utilisées dans le cadre d'évaluations environnementales de projets d'énergies renouvelables issues du bois (par exemple, projet d'installation d'une chaufferie bois) ne prenaient pas en compte les émissions de CO<sub>2</sub> biogénique de la combustion du bois. Le traitement du CO<sub>2</sub> biogénique forestier était particulièrement simple et connu sous le terme de "neutralité biogénique" : tout le CO<sub>2</sub> provenant de la combustion (ou de l'oxydation en général) de la biomasse était considéré comme étant capté lors de la croissance – passée ou future – des arbres (photosynthèse) et la forêt étant supposée stable, le bilan CO<sub>2</sub> apparaissait alors neutre. En d'autres termes, les émissions de CO<sub>2</sub> associées à la combustion étaient considérées comme intégrées dans un « cycle court » du carbone où une captation les compensait immédiatement. Ceci revenait à considérer que la combustion de la biomasse n'émettait pas de CO<sub>2</sub>. (ADEME, 2011).

De façon générale, la combustion du bois produit plus d'émissions GES par unité d'énergie produite que le système fossile de référence (charbon, pétrole ou gaz). Cela est dû au fait que : i) la biomasse contient moins d'énergie par unité de carbone que les produits pétroliers ou le gaz naturel ; ii) la biomasse est généralement brûlée avec un rendement inférieur à celui des combustibles fossiles (Birdet *al.*, 2011). Parmi les auteurs étudiés, différentes valeurs ont été considérées. Schlamadinger *et al.* (1995) et Zanchiet *al.* (2011) considèrent que le charbon émet la même quantité de CO<sub>2</sub> que le bois en combustion et que le gaz émet 40 % de CO<sub>2</sub> en moins que le bois en combustion. Les facteurs d'émissions issus de la base carbone ADEME ([www.basecarbone.fr](http://www.basecarbone.fr)) sont les suivants : les émissions de CO<sub>2</sub> biogénique associé à la combustion totale du bois à 30% de humidité est de 0.390 kgCO<sub>2</sub> / kWhth PCI, soit 1.28 kgCO<sub>2</sub>/kg de bois ; les émissions associées à la combustion de fioul domestique est de 0.329 kgCO<sub>2</sub> / kWh ; les émissions associées à la combustion de gaz naturel est de 0,241 kgCO<sub>2</sub> / kWh. .

Notons également que la combustion du bois émet d'autres GES que le CO<sub>2</sub> à savoir le CH<sub>4</sub> et N<sub>2</sub>O car la combustion est rarement complète. Ces émissions doivent toujours être prises en comptes dans le cadre des évaluations environnementales des projets bois énergie car les seules émissions qui pourraient être compensées par les absorptions en forêt sont les émissions de CO<sub>2</sub>.

Les règles de comptabilisation des émissions d'UNFCC des inventaires nationaux de GES ne considèrent pas la combustion du bois énergie comme carbone neutre. Les émissions du CO<sub>2</sub> provenant de la combustion du bois ne sont pas comptabilisées dans le secteur de l'énergie. Par contre, les variations de stock de carbone dans les écosystèmes forestiers sont comptabilisées dans le secteur forestier<sup>54</sup>. Par exemple, si 1 ha de forêt est coupé et que le bois est utilisé pour la production d'énergie, la perte de carbone dans les écosystèmes est comptabilisée dans le secteur forestier. Afin qu'il n'y ait pas de double comptabilité, les règles permettent aux pays d'ignorer la même quantité de carbone dans la combustion du bois énergie dans le secteur de l'énergie.

Ces éléments de contextualisation énoncés, nous sommes désormais en mesure de préciser notre objectif dans ce deuxième chapitre. Ainsi, sur la base d'une revue de la littérature scientifique internationale, notre objectif sera de présenter des éléments de réponse aux questions suivantes :

- Est-ce que la filière bois énergie (alimentée du bois provenant de récoltes supplémentaires dans la forêt existante) peut être considérée comme « carbone biogénique neutre » ?
- Quelles sont les différentes méthodologies de comptabilisation du carbone biogénique ?
- Quel est le bénéfice du bilan GES de la filière bois énergie à court, moyen et long terme avec la prise en compte du carbone biogénique ?

---

<sup>54</sup> La comptabilisation de la gestion forestière a été calculée comme le résultat des absorptions par la biomasse moins la mortalité et le prélèvement dans les superficies de forêts gérées (CITEPA, 2012).

## 1.2 Limites des hypothèses de la neutralité du carbone biogénique

Depuis la fin des années 2000, de nombreux articles scientifiques (Searchinger *et al.*, 2009 ; EEA Scientific Committee, 2011 ; Jonson *et al.*, 2009 ; Harberlet *et al.*, 2012 ; Schulze *et al.*, 2012 ; Zanchi *et al.*, 2011) ont remis en cause la neutralité biogénique de la filière bois énergie. Leur principal argument tient au fait que le bilan CO<sub>2</sub> des écosystèmes forestiers ne peut pas être considéré comme stable si dans le même temps il y a un changement des pratiques sylvicoles. La mise en place d'une filière bois énergie peut conduire à une intensification du niveau du prélèvement en forêt soit parce que les rémanents qui auparavant étaient laissés dans les écosystèmes sont récoltés, soit parce que le niveau de récolte augmente pour approvisionner en bois la filière.

Ci-dessous, nous allons présenter les principaux arguments utilisés par ces auteurs pour démontrer que le stock de carbone dans les écosystèmes forestiers ne peut pas être considéré comme stable et, par conséquent, que la combustion du bois dans la filière bois énergie ne peut pas être considérée comme neutre :

I. Si le bois énergie provient de la collecte de rémanents qui auparavant étaient laissés dans les écosystèmes:

- Les auteurs remarquent la nécessité de prendre en compte l'éventuel déstockage du carbone biogénique dans les sols, ainsi que la baisse de sa fertilité qui nécessitera l'apport d'engrais pour compenser cette baisse (ce qui engendrera des émissions de N<sub>2</sub>O du sol et des émissions de CO<sub>2</sub> fossiles liées à la fabrication, au transport et à l'épandage des engrais), soit induira une production de biomasse moindre (et donc à un stockage moindre de carbone dans l'écosystème forestier) (Palosua *et al.*, 2001) ;

II. Si bois énergie provient de récoltes additionnelles du bois dans la forêt existante :

II.1) et si l'analyse est conduite à l'échelle de la parcelle :

- Les auteurs soulignent la nécessité de prendre en compte le délai de temps qui existe entre les émissions et les captations par la régénération de la forêt future. Le temps que les molécules de CO<sub>2</sub> restent dans l'atmosphère avant d'être capturées par la régénération contribue au potentiel de réchauffement global (Cherubini *et al.*, 2011).

II.2) et si l'analyse est conduite à l'échelle du paysage :

- a) nécessité de prendre en compte alors qu'une augmentation du niveau de récolte du bois peut mener à un déstockage de carbone dans les écosystèmes. La neutralité du carbone biogénique mettrait, en effet, au même niveau la biomasse provenant d'une forêt qui est gérée de façon durable à celle issue de la déforestation.
- b) nécessité de prendre en compte alors qu'une augmentation du niveau de récolte du bois peut conduire à une diminution du stock de carbone dans les écosystèmes forestiers par rapport à celui que l'on aurait obtenu en l'absence d'intensification de la récolte, même en faisant une gestion durable de la forêt.

Ce dernier argument (II.2 (b)) est fortement soutenu par les auteurs qui critiquent le concept de la neutralité du carbone biogénique. Par conséquent, **la neutralité du carbone biogénique n'est pas atteinte en conduisant simplement une gestion durable de la forêt et en respectant la consigne de ne pas couper plus que l'accroissement biologique.**

Walker *et al.* (2010) présentent un exemple simple afin de montrer qu'une récolte additionnelle du bois pour l'énergie (même si le niveau de prélèvement reste inférieur à l'accroissement de la forêt) peut conduire à une augmentation du niveau de carbone dans l'atmosphère par rapport à l'utilisation de systèmes fossiles. L'exemple propose trois compartiments de carbone: la forêt, l'atmosphère et les combustibles fossiles, chacun de ces compartiments contenant 1000 tonnes de carbone. L'étude prend pour hypothèse que la combustion du bois génère 50% d'émissions en plus que les énergies fossiles de référence. L'étude considère un accroissement biologique de la forêt de 50 t/an et une récolte dans le scénario bois énergie de 15 t/an :

Scénario énergies fossiles : production d'énergie *via* le système d'énergie fossile émet 10 t de carbone du compartiment combustible fossile dans l'atmosphère et il y a une augmentation du compartiment de la forêt de 50 t de carbone.

compartiment combustibles fossiles : 990 t (1000-10)

compartiment forêt : 1050 t (1000 + 50)

compartiment atmosphère : 960 t (1000+10-50)

Scénario biomasse : augmentation du compartiment de la forêt de 50 t – 15 t de carbone déstocké dans la forêt par la génération d'électricité.

compartiment combustibles fossiles : 1000 t

compartiment forêt : 1035 t (1000 + 50-15)

compartiment atmosphère : 965 t (1000+15-50)

Dans l'exemple ci-dessus, l'accroissement de la forêt à l'échelle du paysage est supérieur au niveau de prélèvement (50 t *versus* 15 t) mais le fait d'utiliser de la biomasse forestière augmente le niveau du carbone atmosphérique dans un premier temps.

Harbelt *et al.* (2012) insistent sur l'idée suivante : « *Correct GHG accounting needs to reflect not merely the loss of existing carbon stocks when biomass is produced and used for energy, but also any decline in carbon sequestration that would occur in the absence of bioenergy use. (...) if harvesting is kept below the level of forest growth, carbon stocks are argued to remain constant. But this line of reasoning ignores the additional carbon sequestration that would occur without wood harvesting for bioenergy (the counterfactual), which does not make bioenergy carbon neutral* »<sup>55</sup>.

Le Biomass Energy Resource Center (2012) souligne que : « *simply lowering the rate of emissions would not lower the total stock of carbon in the atmosphere. In reality, GHG concentrations in the atmosphere can fall only when emissions drop below sequestration rates* »<sup>56</sup>.

Pour conclure, une intensification du niveau du prélèvement (soit parce que l'on collecte les rémanents qui auparavant étaient laissés dans les écosystèmes ou soit parce que le niveau de récolte augmente) peut conduire à une diminution du taux de séquestration du carbone dans les écosystèmes. Les auteurs cités alertent sur le fait que la comptabilisation des émissions de CO<sub>2</sub> biogénique de la combustion du bois ne prend pas en compte ce dernier élément. Par conséquent, ces auteurs soulignent que la neutralité du carbone biogénique, plutôt que d'assurer une réduction de la concentration du carbone dans l'atmosphère, peut conduire à une transmission des émissions du secteur d'énergie au secteur de la gestion forestière.

L'Environmental Protection Agency américaine a déjà mené une consultation publique sur la manière de calculer les émissions issues de la combustion de la biomasse et a soumis une proposition législative (Julie, 2011).<sup>57</sup>

## **1.7 Le bénéfice du bilan CO<sub>2</sub> de la filière bois énergie avec la prise en compte du carbone biogénique à travers d'une revue de la littérature scientifique**

Le bénéfice du bilan CO<sub>2</sub> lors la mise en place d'une filière bois énergie (BCO<sub>2</sub> <sub>B</sub>) est estimé en comparant les émissions par quantité d'énergie produite par le système bois énergie avec les émissions du système fossile remplacé.

- Les émissions du système bois énergie (E<sub>B</sub>) peuvent être comptabilisées comme l'addition des deux facteurs: i) émissions fossiles de la chaîne de production de la biomasse forestière (gestion de la forêt, transport, préparation, transformation et distribution) (E<sub>BP</sub>) ; ii) émissions du carbone biogénique lors de la combustion du bois (et de la possible oxydation du bois dans le transport et lors du stockage intermédiaire) (E<sub>BC</sub>) :

<sup>55</sup> « Une comptabilisation correcte des GES doit refléter non seulement la perte des stocks de carbone existants lorsque la biomasse est produite et utilisée pour l'énergie, mais aussi la diminution de la séquestration du carbone qui auraient lieu en l'absence d'utilisation de la bioénergie. (...) Si la récolte est maintenue en dessous du niveau de la croissance des forêts, les stocks de carbone seraient constants. Mais ce raisonnement ne tient pas compte de la séquestration du carbone supplémentaire qui se produirait sans la récolte du bois pour la bioénergie (le contrefactuel), ne permettant pas de considérer la bioénergie comme carbone neutre », en français.

<sup>56</sup> « De réduire simplement le taux des émissions ne diminuerait pas le stock total de carbone dans l'atmosphère. En réalité, les concentrations de GES dans l'atmosphère ne peut diminuer que si les émissions descendent en dessous de taux de séquestration », en français.

<sup>57</sup>Final Deferral for CO<sub>2</sub> emissions from Bioenergy and Other Biogenic Sources under the Prevention of Significant Deterioration (PSD) and Title V (Julie, 2011).

$$E_B(t) = E_{BFP}(t) + E_{BBC}(t)$$

- Les émissions du système fossile remplacé ( $E_F$ ) peuvent être comptabilisées également comme l'addition des deux facteurs : i) émissions fossiles de la chaîne de production du combustible fossile (production, transport, transformation et distribution) ( $E_{FFP}$ ) ii) émissions fossiles de la combustion du combustible fossile ( $E_{FFC}$ ) :

$$E_F(t) = E_{FFP}(t) + E_{FFC}(t)$$

L'équation qui permet d'évaluer le bénéfice du bilan CO<sub>2</sub> de la mise en place d'une filière bois énergie peut être représentée par :

$$(1) \quad BCO_{2B}(t) = E_F(t) - E_B(t) = (E_{FFP}(t) + E_{FFC}(t)) - (E_{BFP}(t) + E_{BBC}(t)),$$

où :

$BCO_{2B}$  : bénéfice du bilan CO<sub>2</sub> de la mise en place d'une filière bois énergie au temps t

$E_F$  : émissions du système fossile remplacé au temps t

$E_{FFP}$  : émissions fossiles de la chaîne de production du combustible fossile remplacé au temps t

$E_{FFC}$  : émissions fossiles de la combustion du combustible fossile remplacé au temps t

$E_B$  : émission du système bois énergie au temps t

$E_{BFP}$  : émissions fossiles de la chaîne de production de la biomasse forestière au temps t

$E_{BBC}$  : émissions du carbone biogénique lors de la combustion du bois au temps t

Dans la littérature consultée, des auteurs restreignent leur analyse à la comparaison des émissions en combustion des deux alternatives (nommées « émissions de consommation des ressources »). C'est-à-dire que ces auteurs n'incluent pas les émissions de la production. Par conséquent, le bénéfice de la filière bois énergie est alors limité à :

$$(2) \quad BCO_{2BC}(t) = E_{FFC}(t) - E_{BBC}(t)$$

où :

$BCO_{2BC}$  : bénéfice du bilan CO<sub>2</sub> de la mise en place d'une filière bois énergie en se limitant aux émissions de consommation des ressources au temps t

$E_{BBC}$  : émissions du carbone biogénique lors de la combustion du bois au temps t

$E_{FFC}$  : émissions fossiles de la combustion du combustible fossile remplacé au temps t

Comme nous l'avons décrit dans les sections précédentes les émissions de combustion du bois n'ont pas été comptabilisées dans les évaluations du bilan GES des projets de bois énergie. Le CO<sub>2</sub> provenant de la combustion de la biomasse était considéré comme étant capté lors de la croissance des arbres avec une forêt supposée stable.

Depuis la fin des années 2000, les méthodes de quantification des GES proposent de comptabiliser les émissions biogéniques en combustion mais en proposant à la fois de compenser ces émissions dans une autre section incluant les impacts que le prélèvement du bois génère sur les stocks de carbone en forêt. C'est-à-dire, si le prélèvement de bois par la filière bois énergie ne génère pas d'impact sur le stock de carbone en forêt, alors toutes les émissions de combustion du bois sont compensées. Par contre, si cette récolte du bois conduit à une perte de carbone en forêt, alors les émissions de la combustion ne peuvent être complètement compensées et les émissions sont égales à cette perte de carbone.

Même si cette vision globale semble admise par l'ensemble de la communauté scientifique, différents éléments restent encore à préciser. Ces éléments sont polémiques puisque leur prise en compte peut conduire à des conclusions totalement différentes. Comme le fait remarquer Kujanpaa *et al.* (2009), **il n'existe pas actuellement de méthodologie qui fasse consensus quant à la prise en compte du carbone biogénique dans les ACV du produit bois et plusieurs méthodologies arrivent à des conclusions contraires**. Ci-dessous, nous analysons quelques-uns de ces éléments en débat :

#### 1. L'échelle spatiale :

Comme nous l'avons décrit dans la section 1.5.1, « La variation de stock de carbone dans les écosystèmes forestiers selon le choix d'une stratégie de préservation ou d'exploitation » peut être évaluée à l'échelle de la parcelle ou à l'échelle du « paysage » ; cette dernière approche peut faire référence à une unité de gestion forestière ou à l'ensemble de la forêt d'une région ou d'un pays. Dans ce travail, nous prenons pour exemple ces deux approches (parcelle et paysage) ; et cela même si l'analyse à l'échelle « paysage » semble

s'imposer dans les dernières études qui analysent les bénéfices en CO<sub>2</sub> de la filière bois énergie. IEA Bioenergy (2012) souligne « *the relevance of considering the landscape scale perspective in evaluating different options energetiques* »<sup>58</sup>.

## 2. Le niveau de référence :

Le niveau de référence (« baseline ») par rapport auquel on compare les impacts de ces prélèvements sur les stocks de carbone en forêt (biomasse et sol). Nous avons identifié deux approches :

- a) La variation nette du stock de carbone en forêt par rapport à la situation de départ (point de référence actuel). Cette approche permet de répondre à la question : « Y a-t-il plus ou moins de carbone stocké dans la forêt à la fin d'une période d'évaluation qu'au début ? ». Nous devons remarquer, comme expliqué dans la section 1.5.1, que pour l'évaluation de « la variation de stock de carbone dans les écosystèmes forestiers selon le choix d'une stratégie de préservation ou d'exploitation » l'échelle spatiale choisie est un facteur clé pour savoir si une intensification du niveau de prélèvement entraîne une perte de carbone dans les écosystèmes forestiers. Par rapport à ce sujet, le IEA bioenergy fait la remarque suivante : « *the choice of the spatial boundary is somewhat arbitrary: should it be the catchment, state, or country? If forest management is altered just on a certain area and management in the rest of the forest area is equal in all scenarios, then from a marginal perspective we need only consider the area where the scenarios differ, to assess the impact* »<sup>59</sup> (IEA, 2012).
- b) La variation nette du stock de carbone en forêt par rapport à la situation « *business as usual* » (point de référence future). C'est-à-dire le stock de carbone qui aurait été obtenu en l'absence d'intensification de la récolte pour l'énergie. Cette approche permet de répondre à la question : « Y a-t-il plus ou moins de carbone stocké dans la forêt à la fin d'une période d'évaluation que ce qui aurait été obtenu sans l'intensification des prélèvements pour le bois énergie ? ». Dans cette approche le choix de l'échelle spatiale n'a pas d'impact.

Dans ce travail, nous avons décidé d'évaluer l'approche (b) car cette approche rend possible l'évaluation du bénéfice potentiel qu'apporterait la création d'énergie *via* l'utilisation de bois issu de l'augmentation du prélèvement dans la forêt existante par rapport à la non intensification du prélèvement en forêt et à la création de cette énergie à travers d'autres systèmes fossiles. Nous considérons que dans le scénario « création d'énergie à travers d'autres systèmes fossiles » la forêt existe et fixe du carbone à un rythme différent que dans le scénario « intensification du prélèvement pour l'énergie ». Nous considérons que si l'on évalue les émissions qui auraient été émises par les systèmes fossiles dans la génération d'énergie nous devons aussi comptabiliser les absorptions de la forêt existante si l'intensification n'avait pas eu lieu. Dans ce travail, nous présenterons des études qui visent à répondre à la question : « Quelle est la différence des émissions nettes dans l'atmosphère si un projet de bois énergie est mis en place (production d'énergie à travers du bois issue d'intensification de récolte dans la forêt existante) par rapport à une situation sans la mise en place du projet (création d'énergie à travers système fossile et gestion forestière actuelle) ? ». En revanche, nous ne répondons pas à la question : Quel est le scénario optimal de gestion de la forêt vis-à-vis de l'atténuation du changement climatique ? Afin de répondre à cette question, différents niveaux de récoltes doivent être analysés (comme cela a été décrit dans le chapitre 1). Parmi ces niveaux de récoltes, il pourrait y avoir des scénarios « préservation » afin d'évaluer l'intérêt de la création de réserves intégrales.

## 3. L'échelle temps :

Comme nous l'avons décrit dans la section 1.4.1, l'échelle de temps considérée est un élément clé lors de l'analyse de la variation de stock de carbone dans les écosystèmes. Si l'analyse est effectuée à l'échelle de la parcelle, plus l'horizon de temps considéré est long et plus la reconstitution du stock est assurée. Si l'analyse est effectuée à l'échelle du paysage, plus l'horizon de temps considéré est long et moins il y a de différences entre le stock du carbone du scénario « d'intensification du prélèvement » par rapport au scénario « sans intensification ». Ceci s'explique par le fait que l'accroissement biologique sera généralement supérieur dans les scénarios d'intensification. Dans ce travail, nous présentons des exemples indiquent la variation de stock de carbone annuellement dans un horizon de temps long.

<sup>58</sup> « la pertinence de considérer l'échelle paysage à fin d'évaluer les différentes options énergétiques », en français.

<sup>59</sup> « Le choix des limites spatiales est assez arbitraire: devrait-il être le bassin, l'état ou le pays? Si la gestion des forêts est modifiée seulement sur une certaine zone et qu'elle est égale dans le reste de la superficie forestière dans tous les scénarios, alors d'un point de vue marginal, pour évaluer l'impact, nous ne considérerons que la zone où les scénarios diffèrent », en français.

Si nous prenons en compte les considérations décrites ci-dessus, il est possible de substituer les émissions du carbone biogénique dans la combustion ( $E_{BBC}$ ) par la variation stock de carbone en forêt entre le scénario « bois énergie » et le scénario « système fossile »<sup>60</sup> ( $\Delta S_{BF}$ ) :

$$(3) E_{BBC}(t) = \Delta S_{BF} = S_B(t) - S_F(t)$$

où :

$\Delta S_{BF}$  : la variation du stock de carbone en forêt entre le scénario « bois énergie » et le scénario « système fossile »

$S_B(t)$  : le stock de carbone en forêt dans le scénario « bois énergie » au temps t

$S_F(t)$  : le stock de carbone en forêt dans le scénario « système fossile » au temps t

Si nous revenons à l'équation (1) :

$$(4) BCO_{2B}(t) = E_F(t) - E_{B(t)}(t) = \underbrace{(E_{FFP}(t) + E_{FFC}(t) - E_{BFP}(t)) + \Delta S_{BF}}_{\text{Emissions nettes fossiles évitées + Variation du stock de carbone dans les écosystèmes}}$$

$BCO_{2B}(t) = \text{Emissions nettes fossiles évitées} + \text{Variation du stock de carbone dans les écosystèmes}$

Par conséquent, le bénéfice du bilan  $CO_2$  de la filière bois énergie  $BCO_{2B}(t)$  est composé de deux facteurs :

- la variation de stock de carbone dans les écosystèmes : comparaison entre le stock de carbone en forêt (biomasse et sol) dans le scénario bois énergie (prélèvement supplémentaire de  $X \text{ m}^3$  du bois ou rémanents) et le stock qui auraient été obtenu dans le scénario « système fossile » (sans prélèvement supplémentaire) ;
- les émissions nettes fossiles évitées grâce à la combustion de ce prélèvement supplémentaire : comparaison entre les énergies fossiles émises dans la filière bois énergie et les émissions qui auraient été émises par d'autres systèmes fossiles lors de la génération d'une quantité d'énergie identique.

Ces deux facteurs ont été déjà analysés et décrits dans le chapitre précédent (section 1.4.1 et section 1.4.4). La variation de stock de carbone dans les écosystèmes dépend principalement de l'origine de la ressource (rémanents ou arbres entiers), le niveau d'intensification du prélèvement, la productivité du territoire (fertilité du sol, climat...) et le type de coupe mené. Les émissions nettes fossiles évitées dépendent principalement de l'intensité GES du système fossile remplacé (combustion et production), de l'efficacité de la combustion du bois et du montant des émissions de la chaîne de production du bois énergie.

Ci-dessous, nous présenterons des exemples d'études qui évaluent le bénéfice du bilan  $CO_2$  de la filière avec cette vision. Dans un premier temps, nous donnerons l'exemple du bois énergie provenant de la collecte de rémanents et dans un second temps, des exemples de récoltes additionnelles de bois dans la forêt existante.

### 1.7.1 Dans la filière bois énergie provenant de la collecte des rémanents

Dans cette approche, le facteur de variation de stock de carbone dans les écosystèmes est réduit à la différence des stocks de carbone dans les écosystèmes lorsque les rémanents sont collectés ou lorsqu'ils sont laissés en forêt. Si les rémanents sont laissés dans les écosystèmes, alors leur décomposition émet lentement du  $CO_2$  et une autre partie du carbone est immobilisée dans le sol sous forme de matière organique. Au contraire, dans le scénario d'exploitation de bois énergie, le carbone biogénique est émis à l'instant de la combustion. Par conséquent, le facteur « variation de stock de carbone en forêt » est limité à l'évaluation de la perte de carbone dans la litière et le sol entre le scénario « collecte de rémanents » et le scénario « laisser les rémanents en forêt ».

Schlamadinger *et al.* (1995) évaluent, dans un modèle théorique à l'aide de données représentatives de la forêt tempérée, une perte de carbone dans le sol dans un premier temps. Dans un deuxième temps, ils comparent cette perte avec le facteur « émissions fossiles évitées » grâce à la valorisation énergétique de ces rémanents. Le facteur « émissions fossiles évitées » prend en compte seulement les émissions de

<sup>60</sup> Le stock de carbone en forêt dans le scénario système fossile est celui d'un scénario de gestion forestière « business as usual », c'est-à-dire « sans intensification du niveau de prélèvement ».

combustion du système fossile remplacé (les auteurs ne considèrent pas les émissions de la chaîne de production, ni celles de la filière bois énergie, ni encore celles du système fossile remplacé). Leur conclusion indique que si le charbon est le combustible fossile remplacé (les auteurs considèrent que le charbon émet la même quantité de CO<sub>2</sub> que le bois en combustion), alors le système bois énergie commence à produire des bénéfices dès le départ. Par contre, si le pétrole (les auteurs considèrent que le pétrole émet 20 % de CO<sub>2</sub> en moins que le bois en combustion) est substitué, alors les bénéfices ne démarrent qu'après 3 ans. Les bénéfices augmentent selon l'horizon de temps considéré. A 20 ans, ils évaluent les émissions dans le scénario bois énergie entre 40 % et 80 % de moins que les émissions du scénario système fossile.

L'étude de Zanchi *et al.* (2012) utilise une méthodologie similaire à celle de Schlamadinger *et al.* (1995) pour un écosystème forestier d'épicéa commun (*Picea abies*) dans les Alpes autrichiennes. Les auteurs apportent des résultats similaires : bénéfices au départ si le charbon est substitué, et bénéfices à partir de 7 à 16 ans respectivement si le pétrole et le gaz sont substitués. Après 30 ans, le scénario bois énergie émet 30 % ou 60 % de moins selon qu'il s'agisse du gaz ou du charbon.

Lindholm *et al.* (2011) étudient le bilan CO<sub>2</sub> de la collecte de rémanents et de souches pour la bioénergie en Suède. Comme dans les études précédentes, les auteurs incluent la variation de carbone stock dans le sol et la litière. Les résultats indiquent qu'à court terme (20 ans), il n'y a pas de réduction des émissions dans le scénario de collecte de rémanents (réduction qui aurait pu être liée à la diminution du taux de décomposition de la matière organique dans le sol). L'horizon de temps nécessaire pour l'obtention de bénéfices de la collecte de souches est plus long que pour la collecte de rémanents. Les auteurs remarquent que les résultats sont probablement sous-estimés car l'étude ne prend pas en compte les effets d'une perte de fertilité liée à la collecte de rémanents ou à la perturbation de la structure du sol liée à l'arrachage des souches.

D'autres auteurs (Sathre et Gustavsson, 2011 ; Domke *et al.*, 2011) incluent dans leur analyse les émissions fossiles de la chaîne de production (transport, transformation, etc.). Ces auteurs évaluent l'impact sur le climat de la collecte, du transport et de la combustion des rémanents (et des souches) *versus* l'impact qui aurait eu lieu si les rémanents avaient été laissés dans les écosystèmes.

Sathre R. et Gustavsson (2011) analysent la collecte de rémanents et des souches en Suède. Afin de mesurer l'impact réel sur le climat de la temporalité des émissions (émissions instantanées lors de la combustion *versus* lente décomposition des rémanents si laissés en forêt), cette étude utilise l'indicateur de forçage radiatif cumulé<sup>61</sup> (CRF)<sup>62</sup>. Les résultats indiquent, comme dans les exemples précédents, la dépendance des bénéfices selon la temporalité (« time-dependent climate benefits ») : après une période de 10 à 25 ans, le CRF commence à être positive. L'horizon du temps dépend de la productivité de la forêt (plus la forêt est productive, moins le temps est important pour l'obtention de bénéfices) et de l'intensité GES du système fossile remplacé.

Domke *et al.* (2011) réalisent l'analyse du bilan CO<sub>2</sub> de la collecte de rémanents destinés à une valorisation énergétique dans une centrale d'électricité de 26 MW dans le nord du Minnesota (États-Unis) *versus* la décomposition des rémanents dans les écosystèmes. Leurs résultats indiquent également une dépendance de l'obtention de bénéfices avec la temporalité. En revanche, dans cette étude, le bénéfice carbone par rapport à l'utilisation du gaz naturel n'est atteint que 48 ans après l'établissement de la centrale.

### 1.7.2 Dans la filière bois énergie provenant de récoltes additionnelles du bois dans la forêt existante

Dans les articles présentés, la filière bois énergie génère une augmentation du niveau de récolte du bois en forêt pour la production d'énergie. Comme nous l'avons décrit précédemment, la variation de stock de carbone dans les écosystèmes peut être estimée à l'échelle de la parcelle ou à l'échelle du « paysage ».

---

<sup>61</sup> Le forçage radiatif est généralement quantifié comme « le taux de transfert d'énergie par unité surfacique du globe, mesuré dans les hautes couches de l'atmosphère », il est exprimé en « watts par mètre carré » (W/m<sup>2</sup>). Un forçage radiatif causé par un ou plusieurs facteurs est dit positif lorsqu'il entraîne un accroissement de l'énergie du système Terre/atmosphère et donc le réchauffement du système. Dans le cas inverse, un forçage radiatif est dit négatif lorsque l'énergie va en diminuant, ce qui entraîne le refroidissement du système.

<sup>62</sup> Par son sigle en anglais : Cumulative Radiative Forcing.

### 1.7.2.1 Analyse à l'échelle de la parcelle

Walker *et al.*(2010) analysent le bilan GES de la production d'électricité *via* la biomasse forestière dans la région du Massachusetts (États-Unis). Cette étude a été l'une des premières et l'une des plus citées. Elle propose les conclusions suivantes : i) la combustion du bois génère, de façon générale, plus d'émissions que les systèmes fossiles substitués et ; ii) cette combustion ne peut pas être considérée comme carbone neutre car la récolte de ce bois génère une variation de stock de carbone dans les écosystèmes.

Cette étude propose de comptabiliser la variation de stock de carbone dans les écosystèmes liée à une augmentation du niveau de récolte à l'échelle de la parcelle où a lieu la récolte supplémentaire.

L'étude propose, dans un premier temps, une approche théorique afin d'illustrer la méthodologie adoptée et la façon de réfléchir. Les auteurs observent le stock de carbone dans une parcelle donnée suite à l'application d'un scénario « *business as usual* » (BAS) et le stock avec un scénario « augmentation du niveau de prélèvement de 20 unités du bois pour la production d'énergie » (« *with biomass harvest* »). Les auteurs évaluent également comment ces stocks évoluent dans le temps (Figure 14 (a)). Ensuite, l'étude compare (Figure 14 (b)) : i) la variation de stock de carbone dans les écosystèmes entre les deux scénarios et ; ii) les émissions qui auraient eu lieu pour créer l'énergie nécessaire à la génération de 20 unités du bois avec l'utilisation d'énergies fossiles (Figure 14 (b)). Cette étude n'inclut, ni les émissions de la chaîne de production, ni celles de la filière bois énergie, ni celles enfin du système fossile remplacé. Comme nous pouvons l'observer dans la figure 12, lors de la première année, 20 t de carbone ont été prélevées en plus que pour le scénario bois énergie. Si l'énergie générée par la combustion de 20 t de bois était générée par des systèmes fossiles, une quantité de carbone inférieure serait alors émise (dans l'exemple 11 t). Par conséquent, dans un premier temps, le scénario « bois énergie » génère plus d'émissions dans l'atmosphère. Les auteurs considèrent ces émissions supplémentaires comme une « dette carbone ». A mesure que le stock de carbone est récupéré dans la parcelle où a eu lieu le prélèvement additionnel, la dette carbone diminue. Une fois la dette remboursée (dans l'exemple, 35 ans), alors la solution « bois énergie » produit des dividendes.

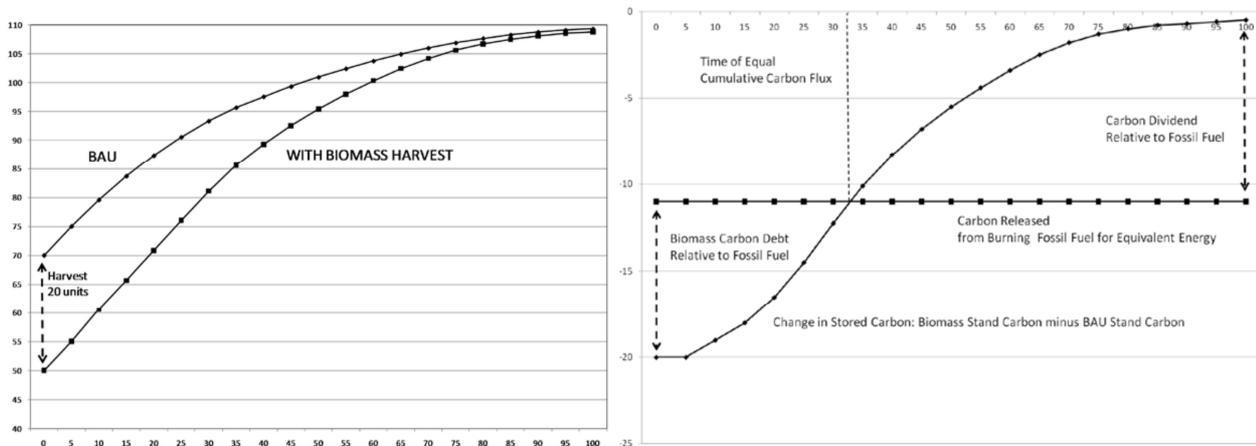


Figure (a)

Figure (b)

**Figure 14. Figure (a) Carbone total de la parcelle (tonnes de carbone) et évolution dans le temps (années) pour un scénario « *business as usual* » et pour un scénario « bois énergie » qui correspond à un prélèvement supplémentaire de 20 unités de bois. Figure (b) Comparaison de la variation de stock de carbone dans les écosystèmes des deux scénarios et des émissions qui auraient eu lieu pour créer la même quantité d'énergie avec l'utilisation d'énergies fossiles. Source : Walker *et al.* (2010)**

Dans cette approche, la neutralité du carbone est atteinte une fois que le stock de carbone de la parcelle dans le scénario « bois énergie » est récupéré, le stock devient alors similaire à celui du scénario « BAS ». L'horizon de temps dépend fortement des pratiques sylvicoles menées et des régimes de perturbations naturelles.

Dans cette étude, Walker *et al.* (2010) observent que la « dette carbone » dépend du système fossile remplacé et de la technologie de combustion de bois utilisée (Figure 15 (b)). L'utilisation thermique de la biomasse (chaleur/énergie) conduit à une période de remboursement de la « dette carbone » plus courte (dans l'exemple, moins de 15 ans si le pétrole est substitué) que lors de l'utilisation de centrales de production

électrique à un même niveau de prélèvement (100 ans électricité / Gaz). Cette différence s'explique par une meilleure efficacité de la combustion du bois.

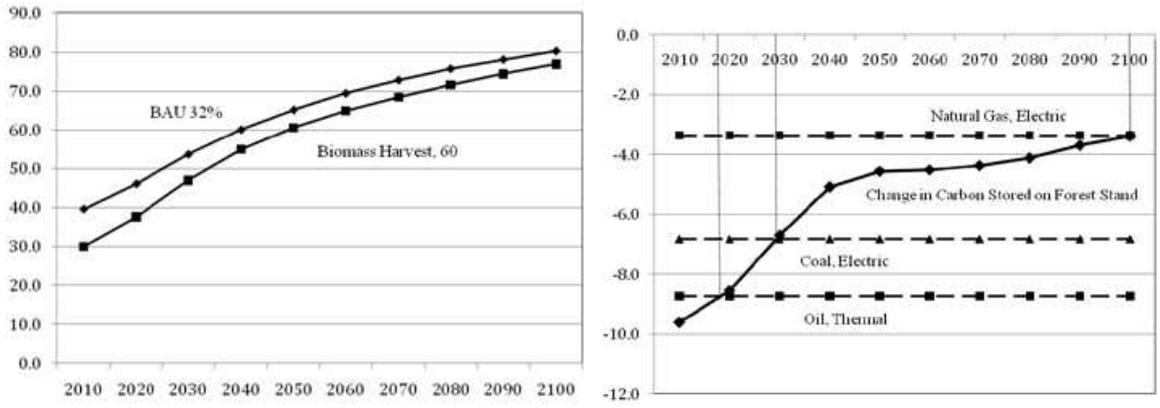


Figure (a)

Figure (b)

Figure 15. Figure (a) Carbone total de la parcelle (tonnes de carbone) et son évolution dans le temps (années) pour le scénario « *business as usual* » (prélèvement de 32 % du carbone de la biomasse aérienne de la parcelle) et pour le scénario « bois énergie » (réduction de la superficie terrière à 60 ft<sup>2</sup> par acre). Figure (b) Période de remboursement de la « dette carbone » selon le système fossile remplacé et la technologie de combustion utilisée. Source : Walker *et al.* (2010)

**1.7.2.2 Analyse à l'échelle du « paysage »**

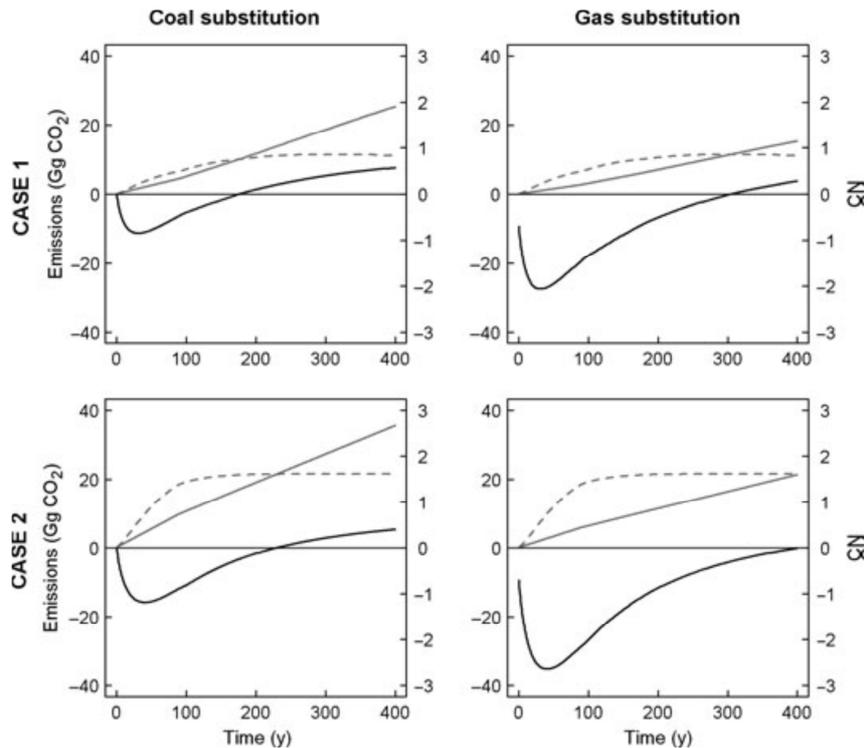
Zanchiet *al.*(2011) analysent les bénéfices GES liées à une augmentation du niveau de prélèvement pour la filière bois énergie par rapport à un système fossile de référence. Les résultats proviennent de l'étude de cas d'un écosystème forestier d'épicéas communs (*Picea abies*) dans les Alpes autrichiennes (Figure 16). Cette étude se limite aux émissions de consommation des ressources (combustion du bois *versus* combustion du fossile de référence). Les émissions de la combustion de bois sont calculées comme la différence de stock de carbone dans les écosystèmes pour le scénario « augmentation du prélèvement » par rapport à celui « *business as usual* » (en pointillés, ligne grise). D'autre part, les émissions du système fossile remplacé (trait plein, ligne grise) sont différentes selon le type de système fossile remplacé (charbon à gauche, gaz à droite). Ces auteurs évaluent les bénéfices de l'utilisation du bois énergie *via* l'utilisation d'un coefficient nommé « carbone neutralité » (CN) :

$$CN = 1 - \frac{\text{EmissionCombustionBois}(t)}{\text{EmissionCombustionSystemeFossile Reference}(t)}$$

Si ce ratio est égal à 1, alors la combustion du bois génère zéro émission nette. Si le ratio est positif (entre 0-1), alors l'utilisation de l'énergie bois génère une réduction des émissions. Si le ratio est négatif, alors il n'existe pas d'avantages en termes de CO<sub>2</sub>.

Comme nous pouvons l'observer dans la figure 16, le coefficient « carbone neutralité » ne devient positif qu'après 175 ans, dans le cas d'une augmentation du prélèvement de 60% à 80% de l'accroissement biologique annuel et lorsque le système fossile remplacé est le charbon. Cette période peut aller jusqu'à 295 ans, dans le cas d'une augmentation du prélèvement de 60% à 80% de la biomasse aérienne dans la parcelle récoltée et avec le gaz comme système fossile remplacé<sup>63</sup>. Les auteurs de cet article remarquent que ces horizons de temps longs peuvent être dus au fait que le bois issu des coupes supplémentaires n'est pas utilisé dans sa totalité pour l'énergie. Les racines et les rémanents seront décomposés en forêt et, par conséquent, il se produit une perte de carbone en forêt qui ne contribue pas à l'effet de substitution énergétique.

<sup>63</sup> Les variations de stock de carbone dans la forêt pour les différents scénarios de cette étude de cas sont montrées dans la figure 7 de la partie 1 section 1.5.1 ;2



**Figure 16. Émissions de consommation des ressources liées à l'utilisation de bois énergie provenant de récoltes supplémentaires (en pointillés, ligne grise) comparées aux émissions du système fossile remplacé (ligne grise). Le facteur CN (ligne noire) tracé sur l'axe secondaire montre quand les émissions liées à l'augmentation du niveau de récolte sont supérieures (CN <1) ou inférieures (CN >1) aux émissions du système fossile. Dans le « cas 1 », le niveau de prélèvement augmente de 60% à 80% de l'accroissement biologique annuel. Dans le « cas 2 », le prélèvement augmente de 60% à 80% de la biomasse aérienne dans la parcelle récoltée. La figure sur la gauche, le système fossile remplacé est le charbon; figure sur la droite, le système fossile remplacé est le gaz. Source : Zanchiet al., 2011**

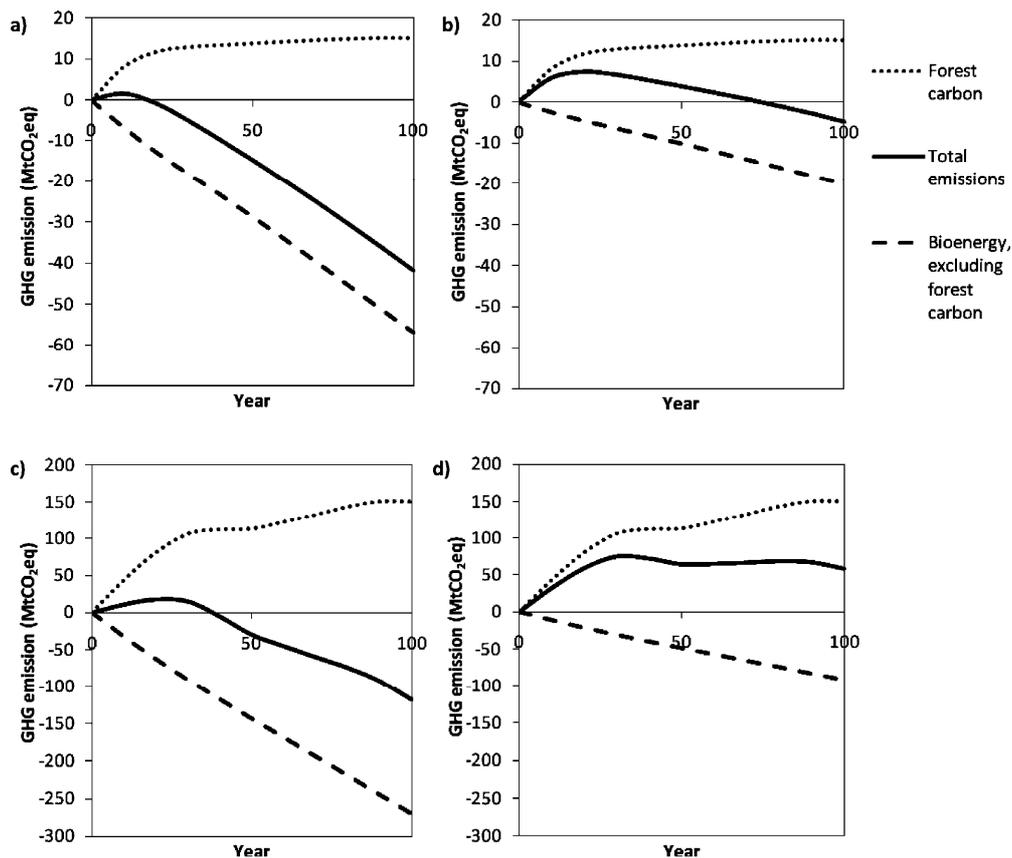
Mckechnie *et al.* (2011) analysent les bénéfices GES de l'utilisation de différents produits bois énergie (granulé, éthanol) *via* une étude de cas en Ontario (Canada).

L'étude est réalisée pour différents types de produits, pour différentes énergies remplacées et pour différents types de gestion forestière (rémanents ou arbres entiers).

- (a) production d'électricité à travers des granulés fabriqués à partir des rémanents, l'énergie remplacée est le charbon (20 % taux de biomasse en co-combustion) ;
- (b) éthanol produit à partir des rémanents, l'énergie remplacée est l'essence (carburant E85) ;
- (c) production d'électricité à travers des granulés fabriqués à partir d'arbres entiers, l'énergie remplacée est le charbon (20 % taux de biomasse en co-combustion) ;
- (d) éthanol produit à partir d'arbres entiers, l'énergie remplacée est l'essence (carburant E85).

Comme nous pouvons l'observer dans la figure 17, les auteurs réalisent leur analyse en deux phases ; ces deux phases correspondant aux deux facteurs décrits en début de section :

- évaluation de la variation de stock de carbone dans les écosystèmes entre le scénario « *business as usual* » et le scénario prélèvement supplémentaire pour le bois énergie (ligne « *Forest carbon* » dans la figure) ;
- les émissions nettes fossiles évitées (ligne « *Bioenergy, excluding forest carbon* » dans la figure). Ce facteur a été estimé en comparant les analyses du cycle de vie de la filière bois énergie (sans la prise en compte des émissions de CO<sub>2</sub> de la combustion du bois) et du système fossile remplacé. Cette étude prend en compte les émissions de la chaîne de production de la filière bois énergie et du système fossile.



**Figure 17. Émissions nettes de CO<sub>2</sub>éq. dans les différents scénarios. (a) production d'électricité à travers des granulés fabriqués à partir des rémanents, l'énergie remplacée est le charbon (taux de substitution de charbon par biomasse de 20 %) ; (b) éthanol produit à partir des rémanents, l'énergie remplacée est l'essence (carburant E85) ; (c) production d'électricité à travers des granulés fabriqués à partir d'arbres entiers, l'énergie remplacée est le charbon (taux de substitution de charbon par biomasse de 20 %) ; (d) éthanol produit à partir d'arbres entiers, l'énergie remplacée est l'essence (carburant E85). Source : Mckechnie et al. (2011)**

La ligne « *Forest carbon* » de la figure 17 nous permet d'observer que l'augmentation du niveau de l'exploitation forestière réduit de manière significative le stock de carbone en forêt. A long terme, la variation de stock de carbone dans les écosystèmes entre les deux scénarios se réduit.

En revanche, les émissions représentées par la ligne « *Bioenergy excluding forest carbon* » (les émissions nettes fossiles évitées *via* le bois énergie) génèrent un bénéfice qui s'accumule dans le temps. Par conséquent, si on additionne les deux facteurs (ligne noire dans la figure 17), alors, après une certaine période de temps, les émissions fossiles évitées compensent la perte de carbone dans les écosystèmes.

Cette période de temps est très variable en fonction du produit (éthanol / granulés), du type d'exploitation (rémanents ou arbres entiers) et de l'énergie remplacée (charbon / essence).

Comme nous pouvons l'observer dans la figure 17, dans le cas du scénario le plus avantageux (granulés / rémanents / charbon), cette période est de 16 ans. Dans le cas le plus défavorable (éthanol / arbres entiers / essence), l'effet de substitution ne compense pas la perte de carbone dans les écosystèmes pour la période étudiée (100 ans).

Une autre étude réalisée récemment pour le Biomass Energie Ressource Center (2012) étudie le bénéfice en terme de CO<sub>2</sub> de la mise en place de 22 centrales de génération d'énergie électrique alimentées par la biomasse forestière provenant de récoltes supplémentaires dans les forêts existantes de la région sud-est des États-Unis.

Comme pour le protocole suivi par Mckechnie et al. (2011), cette étude intègre les ACV « classiques » afin d'estimer les émissions nettes fossiles évitées avec un modèle forestier qui comptabilise la variation de stock de carbone en forêt. Comme nous pouvons l'observer dans la figure 18, l'étude conclut que la mise en place

des centrales électriques alimentées par la biomasse forestière (ligne « *Proposed* » dans la figure) produit un important bénéfice à long terme. Par contre, à court terme, il existe un coût atmosphérique (« dette carbone ») par rapport à d'autres solutions comme « *Natural gaz* » ou « *Charbon* » (autres lignes dans la figure). La « dette carbone » n'est pas remboursée avant une période de temps comprise entre 35 et 50 ans. Cette temporalité varie en fonction de la gestion sylvicole de la forêt, de l'énergie remplacée et de la technologie utilisée.

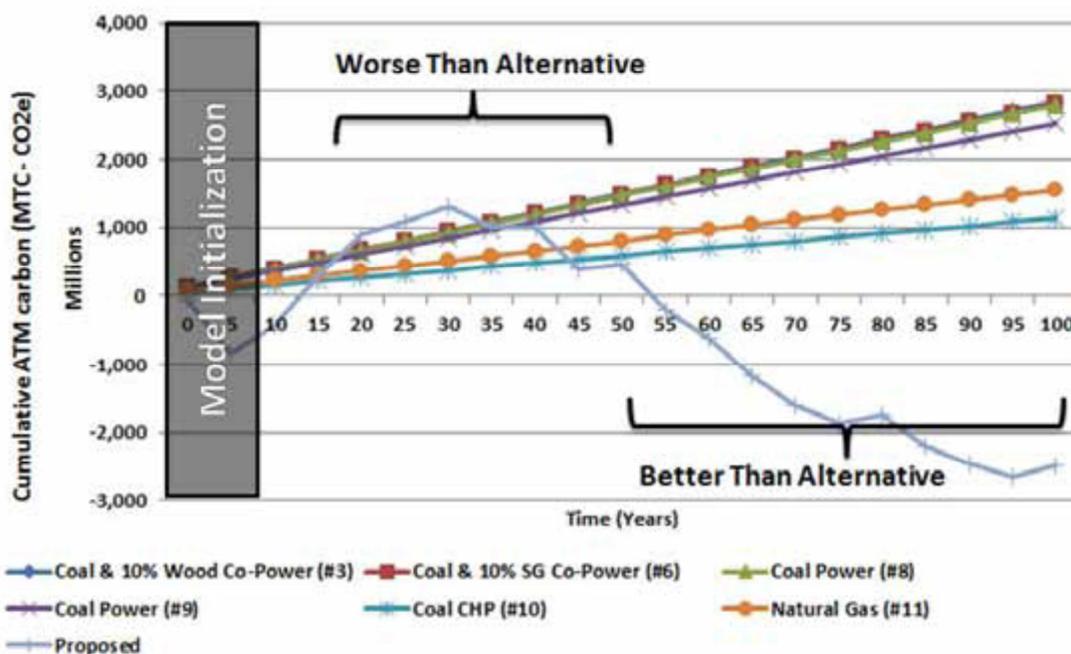


Figure 18. Comparaison du bilan GES atmosphérique des scénarios d'utilisation des énergies fossiles par rapport au scénario proposé (intensification du niveau de prélèvement pour la production d'énergie électrique) dans les forêts des régions sud-est des États-Unis. Source : Biomass Energie Ressource Center (2012)

## 1.8 Conclusions

Dans ce chapitre, sur la base d'une revue de la littérature scientifique internationale, nous avons étudié le bénéfice en termes de bilan CO<sub>2</sub> de la mise en place d'une filière bois énergie alimentée par du bois provenant de récoltes supplémentaires dans la forêt existante (bois provenant de la collecte des rémanents laissés dans les écosystèmes ou d'une augmentation du niveau de prélèvement).

De nombreux articles scientifiques concluent sur le fait que la combustion du bois dans une filière bois énergie basée sur des récoltes supplémentaires dans la forêt existante ne peut pas être considérée comme carbone neutre, contrairement à ce qui a été réalisé jusqu'à maintenant dans les évaluations de la filière bois énergie (ex : ACV). Le principal argument de ces auteurs est qu'une augmentation du niveau de récolte du bois peut conduire à une diminution du stock de carbone dans les écosystèmes forestiers par rapport au cas où il n'y a pas d'intensification de la récolte, et cela même si le prélèvement est inférieur au taux d'accroissement.

Ces auteurs proposent donc d'estimer les émissions liées à la combustion du bois comme équivalentes à la variation de stock de carbone dans les écosystèmes forestiers entre une gestion forestière « business as usual » et une gestion « bois énergie » avec intensification des prélèvements.

Par conséquent, si ce facteur est pris en compte, l'analyse du bénéfice de la filière correspond à l'addition de deux facteurs :

- la variation de stock de carbone dans les écosystèmes entre une gestion forestière « business as usual » et une gestion « bois énergie » avec une intensification des prélèvements;

- les émissions nettes fossiles évitées dans le scénario « bois énergie » par rapport à ce qui aurait été émis par la création d'énergie *via* d'autres systèmes fossiles.

Comme nous l'avons conclu dans le chapitre précédent, la variation de stock de carbone dans les écosystèmes est un facteur qui se stabilise dans le temps dans le cadre d'une gestion durable. En revanche, le facteur des émissions évitées (effet substitution) apporte des bénéfices « indéfiniment ». Par conséquent, si on additionne les deux facteurs, il existe un moment à partir duquel les émissions fossiles évitées compensent la perte de carbone dans les écosystèmes dans le scénario « bois énergie ».

Dans ce cadre, la plupart des auteurs étudiés s'accordent sur les avantages de la mise en place d'une filière bois énergie à moyen et à long terme. Toutefois, à court terme, une intensification du niveau de prélèvement peut conduire à une augmentation transitoire des émissions par rapport au scénario « business as usual » (système fossile et gestion forestière actuelle).

La temporalité à laquelle les scénarios « bois énergie » commencent à générer des bénéfices est très variable et dépend des conditions du territoire, des pratiques sylvicoles et de la caractéristique de la filière bois énergie. Ces éléments peuvent justifier les grandes différences de résultats observées dans la littérature (de 3 ans à 295 ans). De façon générale, dans la littérature consultée, la période de temps dans le cas de la mise en place d'une collecte des rémanents est inférieure au cas où le niveau de prélèvement augmente. Néanmoins, ces études ne prennent pas en compte les effets d'une possible baisse de la fertilité des sols dans le cas de la collecte de rémanents.

Dans cette conclusion intermédiaire, il est important de souligner qu'aucun des exemples présentés dans ce chapitre ne prend en compte les effets potentiels qu'une intensification du niveau du prélèvement peut avoir sur la diminution de l'impact en cas d'événements extrêmes.

Les actions à mener afin de réduire cette période de temps nécessaire à la survenue de bénéfices peuvent être :

- en amont (dans la forêt) : l'utilisation des techniques d'augmentation de la production de la biomasse forestière, l'intensification forestière seulement dans les zones les plus productives, limiter l'impact sur les stocks de carbone des sols (en évitant le labour, la coupe rase, le dessouchage), l'utilisation du bois provenant de traitements préventifs de diminutions des risques sylvicoles de lutte contre les incendies de forêt, de coupes sanitaires, de coupes pour favoriser le développement de certaines espèces plus adaptées à la station écologique ;
- en aval (dans la filière) : la substitution des systèmes fossiles très émetteurs type charbon, l'amélioration de l'efficacité de la combustion du bois, promotion de l'utilisation des ressources locales de bois et notamment la promotion de l'utilisation des déchets industriels et des produits en fin de vie.

## Bibliographie

ADEME, 2011. Rapport Final du Groupe de Travail Carbone Biogénique. Document non publié.

Biomass Energy Resource Center, 2012. Biomass Supply and Carbon Accounting for Southeastern Forests, BERCC, Montpellier, 132 p.

Bird N.D., Cherubini F., Cowie A., Downing M., Gustavsson L., Kojakovic A., Jungmeier G., Moellersten K., Pingoud K., Rueter, S., Schlamadinger, B., Soimakallio, S., Van Stappen, F., Woess-Gallasch S., 2009. IEA Bioenergy Task 38. Ten years of analysing the greenhouse gas balance of bioenergy systems. 17<sup>th</sup> European Biomass Conference and Exhibition, 29 June - 3 July 2009, Hamburg, Germany.

Cherubini F., Peters G.P., Berntsen T., Strømman A.H. and Hertwich E.G., 2011. CO<sub>2</sub> emissions from biomass combustion for bioenergy: atmospheric decay and contribution to global warming. *GCB Bioenergy*, Vol. 3, n°5, pp. 413-426.

Domke G., Becker D.R., D'Amato A.W., Ek A.R. et Woodall C. W., 2012. Carbon emissions associated with the procurement and utilization of forest harvest residues for energy, northern Minnesota, USA. *Biomass and Bioenergy*, 36, pp. 141-150.

European Environment Agency, 2011. Opinion of the EEA Scientific Committee on Greenhouse Gas Accounting in Relation to Bioenergy. 15 September 2011.

IEA Bioenergy etCowie A., 2012. IEA Bioenergy Task 38.Strategic Proposal :Timing of Mitigation Benefits of Forest-Based Bioenergy. ExCo69 Doc 11.02.

Johnson E., 2009. Goodbye to carbon neutral: getting biomass footprints right. *Environmental Impact Assessment Review* 29, pp.165–168.

Lindholm E., Stendahl J., Berg S. et Hansson P.A. , 2011. Greenhouse gas balance of harvesting stumps and logging residues for energy in Sweden. *Scandinavian Journal of Forest Research* 26, pp. 586-594.

McKechnie J., Colombo S., Cheng J., Mabee W. and MacLean HL., 2011. Forest bioenergy or forest carbon? Assessing trade-offs in greenhouse gas mitigation with wood-based fuels.*Environmental Science and Technology* 45 (2), pp. 789-795.

Haberl H., Sprinz D., Bonazountas M., Cocco P., Desaubies Y., HenzeM., Hertel O., Johnson R.K., Kastrup U., Laconte P., Lange E., Novak P., Paavola J., Reenberg A., van den Hove S., Vermeire T., Wadhams P. etSearchinger, T. , 2012. Correcting a fundamental error in greenhouse gas accounting related to bioenergy.*Energy Policy* 45, pp. 18-23.

Sathre R. et Gustavsson L., 2011. Time-dependent climate benefits of using forest residuesto substitute fossil fuels. *Biomass and Bioenergy* 35, pp. 2506–2516

Searchinger T., Hamburg S, Melillo J, Kammen DM, Lubowski R, Oppenheimer M, Robertson GP, Schlessinger W etTilman GD. 2009. Fixing critical climate accounting error.*Science* 326, pp. 527–528.

Schulze E.-D., Körner C., Law B.E., Haberl H. et Luysaert S., 2012. Large-scale bioenergyfrom additional harvest of forest biomass is neither sustainable nor greenhousegas neutral. *GCB Bioenergy*, doi: 10.1111/j.1757-1707.2012.01169.x

Schlamadinger B., Spitzer J., Kohlmaier G.H. etLudeke M., 1995. Carbon balance of bioenergy from logging residues.*Biomass and Bioenergy* 8, pp. 221-234

Walker T., Cardellichio P., Colnes A., Gunn J., Kittler B., Perschel R., Recchia C. etSaah, D., 2010. Biomass Sustainability and Carbon Policy Study.*Report to the Commonwealth of Massachusetts Department of Energy Resources*, Report No.: NCI-2010-03, ManometCenter for Conservation Sciences, Plymouth, 182 p.

Zanchi G., Pena N. et Bird N., 2011. Is woody bioenergy carbon neutral? A comparativeassessment of emissions from consumption of woody bioenergy and fossil fuel.*GCB Bioenergy*, doi: 10.1111/j.1757-1707.2011.01149.x.

# Partie 3 : Positionnement des acteurs de la filière forêt – bois en France Métropolitaine face à l'atténuation du changement climatique

---

## Sommaire

<b>Partie 3 : Positionnement des acteurs de la filière forêt – bois en France Métropolitaine face à l'atténuation du changement climatique.....</b>	<b>66</b>
1.1 Les acteurs contactés lors de notre enquête .....	66
1.2 Informations récoltées .....	67
1.3 Conclusions générales de l'enquête .....	82
Bibliographie.....	83

## Partie 3 : Positionnement des acteurs de la filière forêt – bois en France Métropolitaine face à l'atténuation du changement climatique

Nous avons conduit une enquête auprès des principaux acteurs nationaux impliqués dans des travaux sur la relation entre la filière forêt - bois et le carbone. Notre objectif était d'apporter des éléments de réponse à ces deux principales questions :

a) Comment optimiser la contribution de la forêt française métropolitaine et ses filières bois matériau et bois énergie dans le cadre d'une atténuation du changement climatique ?

b) Est-ce que la filière bois énergie peut être considérée comme carbone neutre ? Quel est le bénéfice du bilan GES de la filière bois énergie à court, moyen et long terme ?

A travers ces entretiens, nous voulions connaître l'opinion de ces acteurs ainsi que les travaux et actions menés par leur organisation. Dans cette optique, un questionnaire a été élaboré (Annexe 1).

L'enquête a été réalisée pendant les mois de mai et juin 2012.

### 1.1 Les acteurs contactés lors de notre enquête

Le questionnaire a été envoyé à 45 personnes représentant les organismes suivants :

- **Représentants du Ministère:**
  - o Ministère de l'Ecologie, du Développement durable et de l'Energie (MEDDE) (\*);
  - o Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt (MAAF) (\*).
- **Représentants des propriétaires et de gestionnaires de la forêt :**
  - Au niveau européen :*
    - o Union des sylviculteurs du sud de l'Europe (USSE) (\*).
  - Au niveau national :*
    - o Centre National de la Propriété Privée Forestière (CNPF) et Institut pour le Développement Forestier (IDF) (\*);
    - o Office National des Forêts (ONF) (\*);
    - o Fédération Nationale des Communes FOREstières (FNCOFOR) (\*);
    - o Union de la Coopération Forestière Française (UCFF).
  - Au niveau territorial :*
    - o Centres Régionaux de la Propriété Forestière (CRPF) (\*).
- **Représentants des industriels mobilisant et transformant le bois :**
  - o Fédération Nationale des Entrepreneurs Des Territoires (FNEDT);
  - o Confédération Française de l'Industrie des Papiers, Cartons et Cellulose (COPACEL) (\*).
- **Représentants de la certification forestière :**
  - o PEFC France;
  - o FSC France (\*).
- **Représentants des Associations environnementales :**
  - o FNE (\*);
  - o WWF (\*);
  - o Pro Silva(\*).
- **Représentants du secteur de la recherche et centres techniques :**
  - o European Forest Institute (EFI) (\*);
  - o INRA Bordeaux;
  - o Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (LSCE), UMR 8212(CNRS / CEA / Université de Versailles Saint-Quentin), Saclay et Gif-sur-Yvette (\*);
  - o Centre d'Ecologie Fonctionnelle et Evolutive (CEFE), UMR 5175(CNRS / Université Montpellier 1, 2 et 3 / SupAgro Montpellier / EPHE / CIRAD / IRD / INRA), Montpellier (\*);
  - o GIP ECOFOR (\*);
  - o Laboratoire d'Economie Forestière (LEF), UMR 356 (AgroParisTech/ ENGREF / INRA), Nancy (\*);

- Laboratoire d'Etude des Ressources Forêt-Bois (LERFoB), UMR 1092 (INRA / AgrParisTech), Nancy (\*);
- CDC Climat Recherche (\*);
- Institut National de l'Information Géographique et Forestière (IGN);
- Centre Interprofessionnel Technique d'Etudes de la Pollution Atmosphérique (CITEPA);
- Institut Technologique Forêt Cellulose Bois-construction Ameublement (FCBA) (\*);
- Xylofutur, pôle de compétitivité.

Nous avons eu un retour de 23 acteurs, organisations signalées avec un astérisque dans la liste ci-dessus. Notons que des acteurs n'ont pas répondu directement à notre questionnaire mais nous ont orienté vers d'autres interlocuteurs experts.

Les coordonnées complètes des acteurs interviewés sont indiquées dans l'annexe 2.

La plupart des entretiens ont été menés par téléphone. D'autres entretiens ont eu lieu en face à face.

Il faut aussi remarquer que tous les acteurs n'ont pas nécessairement répondu à toutes les questions.

## 1.2 Informations récoltées

Ci-dessous, nous présentons un résumé des informations récoltées lors de nos entretiens. Dans un premier temps, les éléments recueillis question par question en suivant le déroulement de notre questionnaire. Dans un second temps, nous synthétiserons les informations récoltées afin d'offrir une vision globale.

### 1. Dans quelle mesure les ressources forestières vous semblent-elles sous exploitées ?

Lorsque cette question est posée, la majorité des personnes interrogées font référence aux données de l'Inventaire Forestier National (IFN) : au niveau national, les prélèvements (44 Mm<sup>3</sup>/an en bois fort IFN, hors mortalité) sont inférieurs à l'accroissement biologique (85 Mm<sup>3</sup>/an). Néanmoins, la majorité des personnes interrogées considèrent qu'il existe des limitations dans l'utilisation de ce ratio (accroissement / prélèvement à l'échelle nationale) pour évaluer la pertinence du niveau d'exploitation des ressources forestières. Ci-dessous, nous résumons les principales limitations de l'utilisation de ce ratio :

#### a) D'une analyse à l'échelle nationale à une analyse à l'échelle locale :

La majorité des personnes interrogées s'accordent pour dire qu'une analyse conduite uniquement à l'échelle nationale n'est pas satisfaisante : Il existe une différence entre la forêt domaniale, communale et privée. La forêt domaniale est actuellement exploitée au même niveau que son accroissement. Les forêts communales et surtout les forêts privées sont dans une phase de capitalisation. Ce fait est lié à la présence de jeunes plantations mais également, pour certains territoires, à un potentiel d'exploitation non valorisé.

L'étude intitulée « Disponibilités en biomasse ligneuse en forêt pour les différents usages du bois » (Ginisty *et al.*, 2011) a été citée par plusieurs personnes. Cette étude n'évalue pas la disponibilité du bois par rapport au ratio accroissement /prélèvement mais par rapport à des scénarios sylvicoles conformes aux préconisations d'une gestion durable. Dans ce travail, la disponibilité nationale supplémentaire est évaluée sur la période 2007-2020 à 14,8 millions de m<sup>3</sup> par an en bois d'oeuvre, à 28,4 millions de m<sup>3</sup> par an en bois d'industrie (moins le bois énergie), et à 8,8 millions de m<sup>3</sup> par an en bois énergie issu de la récolte de menus bois. Notons que les résultats de cette étude indiquent une disponibilité maximale. Celle-ci ne prend pas complètement en compte les facteurs économiques comme les coûts de mobilisation, le prix des produits, les revenus, la taille des propriétés, mais également les facteurs humains comme, par exemple, le système de décision du propriétaire. Ainsi plusieurs personnes s'accordent sur l'idée que « *certaines forêts sont inexploitable (zones de fortes pentes, zones de protections, etc.) mais on considère qu'il subsiste un potentiel de bois mobilisable annuellement non négligeable* ».

Certaines personnes font référence aux difficultés de mobilisation de la biomasse dans les zones évaluées comme sous-exploitées pour des raisons : techniques (coûts de mobilisation, nature des bois et produits forestiers), réglementaires (réglementation environnementale, réserves intégrales), structurelles (morcellement), patrimoniales (valeur patrimoniale des forêts). Ces difficultés peuvent mener à la concentration de l'ensemble de la demande dans les zones les plus favorables (plaines). Cette situation peut selon eux générer des risques de surexploitation.

## **b) Pertinence de prélever l'accroissement biologique :**

Plusieurs personnes interrogées mettent en question la pertinence de prélever la totalité de l'accroissement biologique, notamment liée à l'effet âge.

D'un part, une grande superficie des reboisements réalisés à partir des années 1960 sont encore dans une phase de capitalisation où le prélèvement doit rester nettement inférieur à l'accroissement. Certaines forêts (ex : les forêts méditerranéennes) ne sont pas assez capitalisées, ces forêts sont encore loin de l'équilibre entre production et récolte. Ainsi, ce qui n'est pas récolté contribue à augmenter le capital forestier. Notons ce commentaire : « *le jour où la majorité des peuplements seront surcapitalisés, nous pourrions affirmer qu'il y a sous-exploitation* ».

D'autre part, il peut y avoir des zones surcapitalisées (forêts où l'âge de coupe a été dépassé). Dans ces forêts, dans un premier temps, les prélèvements seront supérieurs à l'accroissement afin d'ajuster l'âge de coupe à des critères de maximisation de la production de bois.

## **c) Précision des données de l'IFN relatives au niveau de prélèvement actuel :**

Notons ce commentaire : « *la récolte est également très mal appréhendée, notamment en ce qui concerne l'autoconsommation des ménages,(..). A cela s'ajoute également la consommation de la ressource bocagère, pour laquelle les données n'existent qu'au travers d'hypothèses peu consolidées* ».

Pour conclure, la majorité des personnes interrogées font référence aux données IFN : exploitation de 55 % de l'accroissement biologique. Des acteurs (certains gestionnaires, secteur industriel et quelques chercheurs) considèrent que, même si l'analyse doit se faire à l'échelle locale et qu'il existe des facteurs limitants (morcellement, inaccessibilité, valeur patrimoniale), ce chiffre donne un ordre de grandeur. Selon eux, ce chiffre est avalisé par des études plus précises, qui montrent qu'une mobilisation de biomasse plus importante et non négligeable est envisageable. D'autres personnes (gestionnaires de forêt privée, organismes de la société civile et certains chercheurs) considèrent que ces facteurs limitant la mobilisation de la biomasse (morcellement, valeur patrimoniale, inaccessibilité, etc.) ne doivent pas être sous-estimés et certains d'entre eux font remarquer de possibles situations de surexploitation dans les zones les plus avantageuses. Aussi certains acteurs (organisations non gouvernementales et chercheurs) ne considèrent pas que les ressources forestières soient sous exploitées parce que ce qui n'est pas récolté contribue à augmenter le stock de carbone forestier.

## **2. Considérez-vous qu'une intensification de l'exploitation forestière puisse contribuer à atténuer le changement climatique ? Si non, pourquoi ? Si oui, comment ?**

La réponse à cette question a été très différente selon les personnes interrogées. Dans un premier temps, nous allons décrire les arguments évoqués en faveur d'une intensification de l'exploitation forestière et, dans un second temps, rapporter les arguments en défaveur de l'application de certains types d'intensification.

Les personnes se positionnant en faveur d'une intensification mettent en avant l'importance de raisonner en termes de « filière forêt bois » plutôt qu'en terme de « forêt ». **Les arguments positifs pour une mobilisation plus importante de la biomasse sont :**

### **a) La flexibilité afin de mieux adapter les pratiques au changement climatique et d'assurer les stocks de carbone en forêt:**

Une dynamisation de la sylviculture (c'est-à-dire raccourcir les révolutions, la substitution d'espèces par d'autres plus adaptées à la station écologique et plus résistantes à la sécheresse, la diminution de la surface terrière à travers des éclaircies, des coupes sanitaires, de la sylviculture de prévention d'incendies) entraîne une diminution des risques (diminution des effets des tempêtes, des risques d'incendies forestiers, etc.) et une augmentation de la résilience.

### **b) Plus de stockage dans les produits bois et plus d'effets substitution matériaux et énergétique :**

Les effets dus à la substitution n'atteignent pas de limite au contraire de l'effet stockage dans les écosystèmes qui arrive à un état de saturation.

### **c) Bois de dimensions appropriées pour la transformation :**

Notons la remarque : « ne pas intensifier l'exploitation forestière conduit à disposer de bois techniquement moins faciles à transformer (très gros bois de résineux, par exemple) et réduit ainsi à terme les possibilités de récoltes économiquement rentables ».

#### **d) La création de développement économique :**

Création d'un tissu industriel de proximité, viable et compétitif. Comment motiver les acteurs privés (propriétaires forestiers et investisseurs) dans leurs projets d'investissement ?

#### **e) Eviter les fuites de carbone :**

« Une plus forte utilisation des ressources forestières nationales permettrait de limiter les importations (et donc l'empreinte carbone du transport) et de tirer profit, lors de la production en France de biens manufacturés, d'un mix énergétique moins carboné que dans la plupart des pays étrangers.(..) Une réduction de l'exploitation forestière conduirait a contrario à une fuite de carbone : la pression sur la forêt à l'étranger augmenterait, ceci afin de satisfaire la consommation française ».

#### **f) Accroître la ressource grâce au développement de cultures énergétiques**

Certains acteurs remarquent que « l'intensification de l'exploitation forestière peut passer par la constitution de périmètres spécialisés (types TCR ou TPCR) destinés à la production de biomasse énergie ou de fibres utilisées en substituant à des molécules issues de la pétrochimie), ou encore de biocarburants de seconde génération. Une stratégie de substitution qui serait axée uniquement sur le bois d'œuvre ne permettrait pas de tirer partie de sylvicultures visant la maximisation de la production de carbone biosourcé. ».

D'autres personnes se sont positionnées en faveur d'une intensification sous certaines conditions liées à la gestion forestière et à l'utilisation du bois. Les conditions suivantes ont été citées : des garanties de gestion forestière durable, sylviculture de prévention des événements extrêmes, récolte à des fins d'usages de bois d'œuvre et favoriser les usages en cascades dans la filière.

**Les arguments négatifs pour certains types d'intensification sont :**

#### **a) L'obtention de bois d'une qualité inférieure qui n'enrichit pas la filière bois d'œuvre mais qui apporte moins de bénéfices en termes de CO<sub>2</sub> :**

Certains acteurs évoquent que, généralement, une intensification du prélèvement ne conduit pas à l'obtention de bois de qualité. Ces acteurs remarquent que la gestion forestière ne doit pas chercher une augmentation de la production en volume de bois s'il n'y a pas dans le même temps une amélioration de la qualité du bois récolté. Ils argumentent le fait que la filière bois d'œuvre favorise des révolutions longues dans la forêt, ce qui génère un stockage moyen élevé. Dans la filière, il y a à la fois un effet de stockage dans les produits à longue durée de vie et un effet substitution matériau. En fin de vie les produits bois peuvent être brûlés. La filière bois d'œuvre génère également des co-produits bois pouvant être utilisés par la filière trituration et bois énergie.

#### **b) Des études scientifiques soulignent que la diminution de stock de carbone dans les écosystèmes liée à l'intensification n'est compensée par les effets substitution qu'à long terme et sous certaines conditions :**

Certains acteurs font référence à des articles scientifiques (Hudiburg *et al.*,2011, Lecocq *et al.*, 2011) qui démontrent que la décapitalisation des forêts par une intensification de l'exploitation forestière n'est compensée qu'à long terme dans une partie importante des superficies étudiées.

Les acteurs remarquent l'importance de l'échelle du temps et de la prise en compte des risques.

#### **c) La prudence qui doit prévaloir en cas d'incertitude :**

Notons ce commentaire : « tant que les incertitudes ne seront pas levées par d'intenses efforts de recherche, c'est la prudence et la modération qui doivent être la règle ».

#### **d) La perte de productivité liée aux effets du changement climatique :**

Du fait du changement climatique, il faut s'attendre à des diminutions de la production dans certaines zones.

#### **e) Risques des pratiques non durables au niveau environnemental :**

Certains acteurs sont inquiets par certaines pratiques de gestion forestière liées notamment à la récolte du bois énergie : coupes rases, courtes révolutions ce qui appauvrit le sol et génère de faibles stockages en forêt.

#### **f) Compétition entre les différents usages du bois qui génère des problèmes sociaux :**

Certains acteurs indiquent également leur inquiétude quant à la compétition entre les différents usages du bois : « *la forte augmentation de la demande du bois énergie entre en concurrence notamment avec la filière trituration et notamment dans des massifs déjà structurellement déficitaires en termes de disponibilité de bois comme, par exemple, en Aquitaine* ». Un acteur a indiqué que « *les pratiques promues par la filière bois énergie dans l'exploitation de taillis de Rhône Alpes ne font pas le tri du bois nécessaire pour l'alimentation de la filière bois matériaux. Ce fait nuit aux scieries du tissu local qui contribuent au maintien d'une activité en milieu rural agissant fortement sur le cadre de vie et l'évolution des paysages locaux* ».

**En conclusion, de la question 2, les éléments positifs d'une intensification sont : i) elle pourrait permettre de mieux s'adapter au changement climatique (ce qui inclut la diminution des risques d'évènements extrêmes) ;ii) La création de développement économique et ; iii) les effets illimités des effets substitution matériaux et énergétique. Les arguments contre l'intensification sont : i) des diminutions de stock de carbone dans les écosystèmes ; ii) des pertes de fertilité du sol ; iii) l'obtention de bois de qualité inférieure qui n'enrichit pas la filière bois d'œuvre et qui apporte moins de bénéfices en terme de CO<sub>2</sub>. Certains des acteurs interrogés ont appuyé leurs propos sur des études qui montrent que la diminution du rythme de séquestration du carbone dans les écosystèmes n'est compensée qu'à long terme par des effets de substitution.**

### **3. Quel équilibre trouver entre séquestration du carbone dans les écosystèmes et la substitution au profit des matériaux économes en énergie et les énergies renouvelables issues du bois ?**

Ci-dessous, nous décrivons les principales idées mobilisées par les acteurs sur cette question.

#### **a) Ne pas prélever plus que l'accroissement et valoriser les effets positifs du bois dans la filière :**

« *Si l'accroissement est récolté, la forêt sera neutre (maintien de stocks de carbone forestiers) mais la filière positive (augmentation des effets de substitution énergie/matériau, augmentation du stockage de carbone dans les produits)* ».

#### **b) Sécuriser les stocks et faire le plein des effets de substitution :**

L'obtention de masses plus stables face à des évènements extrêmes via une sylviculture dynamique qui fournit du bois et rend des effets substitution.

#### **c) Mettre en place des plantations très productives**

Certains acteurs ont remarqué *l'intérêt des plantations très productives comme les "pompes à carbone" (productivité supérieure liée à des flux annuels de carbone plus importants.*

#### **d) Protéger des forêts anciennes et exploitation dans les territoires plus productifs**

Une personne fait référence aux résultats d'une étude (Nabuurs *et al.*, 2008) qui suggère que pour des forêts avec une grande quantité de biomasse sur pied et une faible productivité, comme les forêts anciennes, la stratégie la plus efficace est de protéger la forêt existante. Cette stratégie peut également contribuer à la préservation de la biodiversité. Par contre, dans les zones où l'on peut s'attendre à une productivité élevée, la stratégie la plus efficace consiste à gérer la forêt pour une récolte durable et à utiliser le bois avec une efficacité maximale.

#### **e) Adapter l'âge de la coupe au maximum de productivité du bois et mener un régime d'éclaircies approprié**

Certains acteurs remarquent l'importance d'adapter l'âge de la coupe au maximum de productivité et de mener un régime d'éclaircies approprié afin de rendre la forêt plus productive ce qui génère des systèmes filière forêt-bois optimales d'un point de vue carbone.

#### **f) Allonger l'âge de coupe**

Certains promeuvent un allongement de l'âge de coupe afin de récolter du bois de qualité et de posséder des stocks élevés en forêt.

#### **g) Créer davantage de zones de réserve intégrale**

Certains acteurs promeuvent aussi la création de plus de zones de réserve intégrale. Notons cet argument : « *la mise en place d'un réseau de forêts en libre évolution, (..) , présenterait le meilleur bilan carbone sur au*

moins 100 ans, étant donné que nous ne disposons pas, actuellement, de forêts suffisamment matures d'un point de vue biologique ».

#### **h) Traiter de manière efficace la question des conflits d'usage**

*Notons le commentaire : « si la promotion de l'usage énergétique du bois conduit à utiliser des bois servant à la production de produits manufacturés, on risque de conduire à une fuite de carbone (arrêt de la production de ces biens en France, et report des émissions liées à leur production dans d'autres pays). »*

#### **e) favoriser la substitution dans les régions proches des bassins de consommation**

*« une option serait de favoriser la substitution dans les régions proches des bassins de consommation et de favoriser la séquestration dans les régions qui en sont éloignées. »*

#### **h) Mener des études complémentaires pour améliorer la connaissance sur cette question**

Plusieurs auteurs remarquent la nécessité de mener des études afin de répondre à cette question avec une approche globale, qui prend en compte l'ensemble de la filière forêt bois et pas simplement la forêt. Ils remarquent aussi l'importance de l'échelle du temps et de la prise en compte des risques des événements extrêmes.

Pour conclure, certains acteurs promeuvent le maintien des stocks actuels, l'utilisation du bois de façon efficace en termes de CO<sub>2</sub> et la création de plantations productives. D'autres acteurs soutiennent une augmentation des stocks actuels et des mesures afin de favoriser le bois de qualité. D'autres acteurs encore, remarquent la nécessité de mener des études qui prendraient en compte l'ensemble de la filière forêt /bois. Ces études permettraient d'identifier les zones et les conditions les plus intéressantes pour les stratégies de stockage par rapport aux stratégies de substitution.

### **4. Selon vous, quel écosystème a le meilleur bilan GES au long de son cycle de vie : une forêt ancienne non exploitée (option 1) ; une forêt exploitée de façon durable (ne pas couper plus que l'accroissement de la forêt et régénération ultérieure) (option 2)?**

**La plupart des acteurs nous ont répondu que la deuxième option (une forêt exploitée de façon durable) obtenait le meilleur bilan GES au long de son cycle de vie.**

L'argument principal est que le stock en forêt est supérieur dans les forêts anciennes mais le bilan sera plus positif pour les forêts gérées à travers l'utilisation du produit bois. Il a également été fait mention du risque d'un déstockage massif en cas d'événements extrêmes dans les forêts anciennes.

**Certains acteurs soulignent la complexité de la question et insiste sur le fait que la réponse dépend notamment de la période de temps et du périmètre considéré :**

Ils remarquent que cela dépend du périmètre considéré (prise en compte du carbone dans les produits bois et des effets substitutions), du type des forêts (niveau de résistance aux événements extrêmes), pratiques de gestion sylvicole mises en œuvre (âge de coupe choisi, valorisation ou non des rémanents ;; réalisation de coupes rases), usage du bois (matériaux, fibre, énergie) et l'échelle de temps adoptée ».

*Notons le commentaire « Il faut attendre très longtemps (plusieurs centaines d'années) avant que les stocks de carbone cessent de s'accumuler dans les écosystèmes forestiers. Le bilan en termes de stockage de carbone est donc plus favorable en « laissant pousser », mais on se prive des effets de substitution. Une fois que cet équilibre est atteint, les peuplements forestiers cessent de stocker, alors que pour les forêts gérées, les effets de substitution sont renouvelables à l'infini. A long terme, avantage donc aux forêts exploitées durablement. Enfin, certaines forêts ne sont installées que pour être exploitées. Dans ce cas là, la comparaison se fait entre une forêt exploitée durablement et pas de forêt... ».*

Certains acteurs font référence à des études qui montrent que les forêts anciennes continuent à stocker du carbone et que ce phénomène peut d'ailleurs être plus important lorsque l'on prend en compte les effets du changement climatique. Dans sa thèse co-financée par l'ADEME en 2005, P. Vallet a étudié la substitution de feuillus à croissance lente par des résineux à croissance rapide. Cette substitution serait un puits de carbone pendant plusieurs décennies mais s'avèrerait un stock de carbone moyen inférieur en forêt sur le long terme.

**Certains acteurs soulignent l'importance de ne pas réfléchir qu'en terme de flux et de prendre en compte le stock de carbone.** Ils indiquent qu'il est plus juste de réfléchir en stock plutôt qu'en flux. Les plantations nouvelles, à accroissements rapides, ont un flux annuel important mais un stock en forêt très faible. Les forêts anciennes peuvent avoir un flux annuel faible mais des stocks très importants. Il faut aussi

considérer le stock de carbone dans le sol, dans des plantations à courte révolution, il peut y avoir des pertes de carbone liées à un temps de récupération faible.

**Certains acteurs considèrent que les forêts en libre évolution présentent le meilleur bilan carbone sur au moins 100 ans.**

## **5. Considérez-vous que la filière bois énergie puisse être considérée comme carbone neutre ?**

Avant tout, il est intéressant de remarquer que cette question a été interprétée de façon différente selon les acteurs. Certains acteurs évaluent la neutralité du carbone de la filière bois énergie en ne prenant en compte que les caractéristiques de cette filière et, d'autres acteurs qui évaluent la neutralité carbone par rapport à d'autres systèmes fossiles.

Dans un premier temps, nous rapporterons **les arguments donnés par les acteurs qui évaluent la neutralité selon les seules caractéristiques de la filière bois énergie :**

Parmi les acteurs soutenant une telle approche, nous trouvons des acteurs qui considèrent la filière carbone neutre sous certaines conditions, d'autres qui remarquent que cela dépend et d'autres, encore, dont la réponse est négative.

### **a) Oui à condition de mener une gestion durable des forêts :**

La filière est carbone neutre à long terme (hors émissions fossiles liées à l'exploitation et la filière) dans la mesure où il n'y a pas de création de carbone supplémentaire dans l'atmosphère (pas de déforestation qui conduit à la ré émission du carbone stocké dans le sol sans possibilité de re-stockage d'où l'impératif de la gestion durable). Le temps de re-stockage du carbone en forêt dépend de sa dynamique de croissance et donc de la sylviculture choisie.

### **b) Oui à condition que le stock forestier soit maintenu dans le temps :**

Certains acteurs remarquent l'importance d'établir un niveau de référence sur le stock de carbone en forêt afin de mesurer la perte ou le gain du carbone forestier.

### **c) Oui à condition notamment que l'installation de production d'énergie soit efficace :**

*« le bois est un médiocre combustible, ayant un facteur d'émission élevé (...). Pour compenser cet effet et que le bois énergie soit considéré comme durable, il est nécessaire que l'installation de production d'énergie ait une efficacité suffisante (supérieure à 80 %) ».*

### **d) Cela dépend de la gestion forestière menée :**

*Des exemples : « dans une plantation de Picea, si le prélèvement est similaire à l'accroissement, alors le stock de carbone reste stable. Par contre, si le système de production et les espèces changent, alors il peut y avoir une perte ou un gain de carbone. Si le Picea est remplacé par du taillis, alors il y a une perte de carbone. Cela dépend de la situation de départ et du système introduit ».*

### **e) Non car la filière bois énergie génère des émissions temporaires :**

Notons le commentaire : *« Ce ne serait le cas que si le bois servant pour la biomasse était issu de forêts non préexistantes et installées à cette fin. D'une manière générale, la réponse est donc non car une émission temporaire, même si elle est bien plus intéressante qu'une émission brute, reste moins intéressante que pas d'émission du tout. Ainsi, si une chaudière émet chaque année une quantité de CO<sub>2</sub> qui met 20 ans à se restocker dans le cadre d'une gestion durable de la forêt, on accumule en régime permanent l'équivalent de 20 ans de CO<sub>2</sub> issu de la forêt dans l'atmosphère. Ce seuil ne sera théoriquement jamais dépassé en régime permanent car au bout de la 20ème année le carbone émis l'année 'n' sera compensé par le carbone de l'année 'n-20' restocké. Le résultat est donc plutôt intéressant par rapport à une chaudière à combustible fossile qui va rejeter sans compensation son carbone année après année, mais ça n'est pas « carbone neutre ». Si en plus, le bois énergie est prélevé au détriment du bois de trituration et surtout du bois d'œuvre, on se prive des effets de substitution matériau et de stockage matériau. L'efficacité se dégrade alors nettement. Si enfin, on coupe pour le bois énergie des forêts préexistantes sans reboiser, le bilan devient franchement catastrophique puisqu'on déstocke en plus du carbone forestier sans compensation ».*

### **f) Non car les hypothèses de la neutralité annihile l'efficacité énergétique réelle des processus de combustion et de production :**

« Cette hypothèse simplificatrice fait appel à un processus de compensation virtuel (..), cet avantage concurrentiel annihile toute approche discriminante de l'efficacité énergétique réelle des processus, que ce soit au niveau du rendement énergétique de la combustion que de la logistique de production, de récolte et d'approvisionnement. ».

#### **g) Non car la décapitalisation en forêt n'est pas compensée par le stockage dans le produit**

Certains acteurs soutiennent que la filière génère une décapitalisation de la forêt qui n'est pas compensée parce que la filière ne génère pas de stocks dans le produit.

Dans un second temps, nous rapportons les arguments **donnés par les acteurs qui évaluent la neutralité par rapport à d'autres systèmes fossiles :**

#### **a) Carbone positif selon l'échelle de temps, l'échelle spatiale et le périmètre considérés :**

Certains acteurs remarquent que, de façon générale, la mise en place d'une filière bois énergie génère une intensification du niveau de prélèvement en forêt, ce qui génère plus d'émissions. Dans ce cadre, l'échelle de temps considéré est le facteur clé lorsqu'on analyse les avantages de la filière par rapport à d'autres systèmes fossiles non renouvelables, sur le moyen et long terme « carbone positif ». Certains soulignent aussi l'importance de l'échelle spatiale dans les méthodes d'analyse et l'importance des périmètres considérés.

#### **b) Carbone neutre ou positif selon la distance d'approvisionnement, utilisation des sous-produits bois et si la filière génère une diminution réelle des autres systèmes fossiles :**

D'autres acteurs font référence à l'importance de : i) l'approvisionnement local ; ii) une substitution réelle des autres systèmes fossiles, c'est-à-dire est-ce que l'énergie créée à partir du bois réduit réellement les entrées de pétrole ou des autres systèmes fossiles ? La gestion forestière doit avoir une approche multifonctionnelle dans laquelle le bois énergie serait un sous-produit.

### **6. Quel rôle peut jouer la collecte des rémanents (menu bois et branches) pour une utilisation énergétique dans la contribution à l'atténuation du changement climatique ? Quels sont les éléments favorables ? Quels sont les éléments défavorables ?**

Nous allons résumer les éléments favorables et défavorables donnés par les différents acteurs qui ont répondu à notre enquête.

#### **a) Les éléments favorables :**

Plusieurs acteurs font remarquer que les rémanents sont de **nouvelles ressources forestières qui apportent des bénéfices économiques**, (*complément de revenu pour les sylviculteurs, évite un délaissement des parcelles*). Ils ont aussi souligné que cette ressource est **intéressante dans les zones où les conflits d'usage des bois peuvent survenir**.

Certains acteurs soulignent également que la récolte des souches intervient dans la prévention de certains pathogènes des forêts (fomes, etc.) et permet de faciliter et de **diminuer le coût des reboisements ultérieurs**.

#### **b) Les éléments défavorables :**

Plusieurs acteurs font remarquer que la collecte des rémanents peut conduire à une **perte de biodiversité, à un tassement des sols** (les rémanents étant souvent utiles pour limiter l'impact physique des engins forestiers sur les sols), **à une perte de carbone dans le sol et à une perte de fertilité** sur le long terme. Les **difficultés techniques** (travaux mécanisés nécessitant certaines conditions d'accessibilité) qui rendent parfois la collecte non rentable ont été également soulignés. Certains acteurs remarquent qu'il est **important** de laisser du **bois mort** en forêt (pour la fertilisation des sols), de plus la collecte de rémanents dans les forêts méditerranéennes peut **contribuer** à augmenter le **stress hydrique**.

Ci-dessous nous décrivons le positionnement des différents acteurs consultés lors de notre enquête :

#### **a) Acteurs réticents à la collecte de rémanents à cause de ces effets négatifs :**

Certains acteurs se positionnent de la façon suivante : « *Collecter les rémanents coûte cher financièrement et environnementalement. Il y a bien d'autres façons de faire du bois énergie qu'en exploitant les rémanents* ». « *Je crois que la piste des déchets de bois peut peut-être s'avérer plus intéressante que celle des menus bois* ». ».

« Chaque situation doit être évaluée à l'échelle de la parcelle, en fonction du bilan biologique et du bilan carbone local. Quoi qu'il en soit, l'augmentation exagérée du prélèvement des rémanents conduit à une diminution de la fertilité et donc à une réduction de la capacité future de fixation de carbone par les forêts ».

#### **b) Acteurs qui font référence aux mesures à mener afin de pallier les effets négatifs :**

Différentes mesures ont été évoquées afin de pallier les effets négatifs (essentiellement au risque sur la fertilité des sols) de la collecte des rémanents : la limitation de la récolte des rémanents verts ou du bois plus fin car c'est lui qui contribue le plus à la fertilité du sol (promouvoir une récolte après la chute des feuilles ou des aiguilles, laisser sécher, ne récolter que le menu bois du tronc), amendements afin de baisser l'acidité du sol (par exemple, épandage de cendres sous foyer de chaufferies bois), l'aménagement des pratiques sur les sols fragiles.

Certains acteurs remarquent l'importance d'établir une régulation, selon le type du sol et de sa fertilité, afin de limiter une collecte de rémanents généralisée qui pourrait causer d'importants problèmes environnementaux.

Pour conclure, toutes les personnes interrogées ont conscience des effets positifs et négatifs de la collecte de rémanents. Certains acteurs du monde de la recherche et de la société civile considèrent que du fait des effets négatifs, la collecte massive de rémanents ne doit pas être promue. Certains gestionnaires et des acteurs du secteur industriel considèrent que l'application de mesures appropriées peut conduire à pallier certains de ces effets.

### **7. Selon vos critères, quelles sont les pratiques sylvicoles qui peuvent favoriser les puits de carbone en forêt ?**

Plusieurs auteurs font remarquer l'importance de conduire une réflexion au niveau de l'ensemble de la filière forêt bois et pas uniquement au niveau de la forêt. Notons les commentaires : « *en effet, c'est l'ensemble du système carbone qu'il faut considérer ; la question demanderait donc, de mon point de vue, à être reformulée. D'autre part, en admettant qu'on désigne par puits de carbone le bilan net de carbone séquestration, stockage et substitution compris, alors, dans bien des cas, les études montrent que les pratiques sylvicoles à favoriser s'écartent peu des pratiques s'attachant à optimiser la production de bois.* »

« *si on ne réfléchit qu'au niveau de la forêt, alors la stratégie optimale est de diminuer les éclaircies. Par contre, cette stratégie n'est pas optimale si l'on conduit une réflexion au niveau de l'ensemble de la filière bois.* »

L'importance des stratégies d'adaptation au changement climatique a également été soulignée : « *La gestion sylvicole doit aussi permettre l'atténuation de l'effet des changements climatiques sur le devenir de la forêt. Pour le monde méditerranéen, il faut donc réfléchir à une gestion à long terme compatible avec l'augmentation prévue de la demande évaporative et donc du stress hydrique subi par la forêt* ».

Ci-dessous, nous présentons quelques commentaires évoqués par les acteurs en relation aux pratiques sylvicoles.

#### **a) Quelques commentaires sur la mise en exploitation des forêts :**

Les avis sont partagés :

##### **Relancer la sylviculture :**

- Dans les recommandations pour l'amélioration de la séquestration carbone en forêt l'étude intitulée : « *Evaluation du potentiel de capture carbone du territoire boisé Pays Vallée de la Sarthe* » (Forêt Privée Française et al., 2012)<sup>64</sup> propose de : « *relancer la sylviculture des forêts peu ou pas gérées afin d'optimiser leur potentiel de production de bois d'œuvre* » .
- « *une gestion forestière soutenue (éclaircies et renouvellement des peuplements) qui permet de faire fonctionner de manière optimale la machine photosynthétique que constitue une forêt et permet de produire un panier « produit-énergie » optimal. La séquestration du carbone en forêt est directement liée à sa croissance*».

##### **Protection des forêts anciennes et création de zones de réserves :**

- « la mise en place d'un réseau de forêts en libre évolution, (..), présenterait le meilleur bilan carbone sur au moins 100 ans »,

#### **a) Quelques commentaires sur l'âge de coupe ou les révolutions forestières optimales :**

Les avis sont partagés :

##### **Raccourcir les révolutions :**

« les itinéraires sylvicoles pourraient être raccourcis et accompagnés de plantations pour accroître le nombre d'arbres en période de forte croissance et donc de stockage de carbone ».

« raccourcir les révolutions pour diminuer les risques et pour mieux s'adapter au changement climatique ».

##### **Adapter l'âge de coupe au maximum de la productivité du bois :**

« augmenter la productivité de la forêt en adaptant l'âge de coupe au maximum de la productivité du bois »

##### **Allonger les révolutions afin d'obtenir un stockage moyen supérieur en forêt et bois de qualité**

« l'allongement des révolutions afin de récolter du bois de qualité et d'obtenir des stocks élevés en forêt ».

#### **b) Quelques commentaires sur le régime des éclaircies et la densité optimale :**

De la même façon, il n'existe pas du consensus au sein des acteurs :

##### **Façonner des peuplements moins denses :**

« façonner des peuplements moins denses comme option d'adaptation au changement climatique afin d'assurer les stocks, d'obtenir les diamètres d'exploitabilité à des âges plus précoces ».

##### **Croissance maximale à l'échelle de la parcelle :**

« les éclaircies qui permettent de favoriser une croissance maximale à l'échelle de la parcelle et non pas à l'échelle de l'arbre, tout en maintenant les risques à des niveaux acceptables ».

##### **Itinéraires qui maintiennent des forêts denses :**

Dans leur présentation intitulée « Le carbone et les futaies de chêne : Quelle gestion adopter ? » M. Fortin (LERFoB) et al., 2011) soulignent que pour améliorer le bilan de carbone dans les futaies de chêne, les : « itinéraires qui maintiennent des forêts denses semblent appropriés ».

#### **c) Quelques commentaires évoqués sur les espèces :**

##### **Résineux pour convertir les peuplements inadaptés, favoriser les essences résistantes et performantes (tester des essences exotiques) et TCR ou futaie "rapide":**

« rechercher des solutions en résineux pour convertir les peuplements inadaptés, (par exemple, le cas du douglas pour remplacer le hêtre) « favoriser les essences résistantes et performantes sous climats plus secs : tester des essences exotiques » , « Cultures productives dédiées à l'énergie, TCR ou futaie "rapide" ».

##### **Favoriser les essences mieux adaptées et les mélanges des espèces afin d'augmenter la stabilité et la production :**

Dans le cadre des stratégies d'adaptation, dans certains endroits, l'ONF a prévu de substituer le chêne pédonculé par le chêne sessile. Ces stratégies font aussi référence aux mélanges des espèces afin d'augmenter la stabilité et la production.

Dans l'étude sur le pays de la Sarthe (Forêt Privée Française et al., 2012), les auteurs soulignent la nécessité de : « relancer le renouvellement des peuplements âgés et des chênaies déperissantes face au changement climatique ».

##### **Espèces de longues révolutions forestières comme certains feuillus :**

« il est important de réfléchir en stock et par conséquent de favoriser les espèces de longues révolutions forestières comme des feuillus ».

##### **Amélioration génétique :**

« développer et déployer les résultats de la recherche génétique et sylvicole (adaptation au changement climatique des essences, croissance plus rapide) ».

#### **d) Quelques commentaires évoqués sur le type de coupe et de structure (régulière / irrégulière) :**

Le rapport intitulé « Pour une gestion forestière et une filière forêt-bois multifonctionnelle » (J.L. Peyron (GIP ECOFOR) et Yvon, 2011) montre les avantages d'une sylviculture nommée continue et naturelle qui favorise les structures irrégulières. Certains acteurs mettent également en avant une sylviculture irrégulière, continue et proche de la nature. « *Une sylviculture proche de la nature correspond à un traitement des écosystèmes forestiers basé sur la continuité du couvert et le respect le plus élevé possible des processus naturels de croissance et de renouvellement de la forêt* ».

« *Les traitements en futaie jardinée ou en taillis sous futaie (TSF) sont tout à fait indiqués pour favoriser une telle sylviculture permettant une régénération naturelle continue.* ».

#### **f) Quelques commentaires évoqués sur la structure (futaie / taillis) :**

l'étude intitulée « Valorisation carbone de la filière forêt-bois en France » (Deheza *et al.*, 2010) qui observe dans les projets où « *les forêts restent des forêts* »<sup>65</sup> un exemple de conversion de taillis de châtaigner en futaie irrégulière.

L'initiative territoriale des projets de compensation forestière en Bas Dauphiné promeut aussi la conversion de taillis en futaie irrégulière (Cassetet *al.*, 2012)

#### **g) Quelques commentaires évoqués sur le sol :**

« *maintien des rémanents au sol (en particulier ceux de moins de 7 cm de diamètre fin bout) afin d'éviter une baisse de fertilité du sol* ».

Dans l'étude sur le pays de la Sarthe (Forêt Privée Française *et al.*, 2012) : « *Limiter l'impact sur les stocks de carbone des sols (en évitant labour, coupe rase, dessouchage) qui peuvent représenter la moitié du stock de carbone forestier* ».

#### **d) Quelques commentaires sur le type de régénération :**

« *importance de la régénération naturelle notamment comme une stratégie d'adaptation afin d'assurer l'adaptation des espèces aux conditions du territoire* ».

#### **f) Quelques commentaires évoqués sur les techniques d'augmentation de la production :**

Dans le document intitulé « Valorisation du carbone de la filière forêt-bois en France » (Deheza *et al.*, 2010), l'auteur utilise l'exemple d'une surdensification. Cet article indique également la possibilité de mener des projets de fertilisation phosphorée. Ces projets ont un impact sur la productivité des forêts et donc sur la capacité de séquestration dans l'écosystème.

Comme nous pouvons le remarquer ci-dessus, **il n'existe pas de consensus sur les pratiques sylvicoles optimales vis-à-vis de l'atténuation du changement climatique pour les différents acteurs avec qui nous nous sommes entretenus.** Les stratégies évoquées peuvent même être complètement opposées par l'arbitrage entre l'effet de substitution et l'effet de stockage (de la dynamisation de la sylviculture, le raccourcissement des rotations, le façonnement de peuplements moins denses et la mise en place de plantations très productives ou de pratiques qui promeuvent l'allongement de l'âge de coupe, le maintien des forêts denses ou encore la création de zones de réserves).

Le document intitulé « *European Forestry in the Face of Climate Change* » (EUSTAFOR, 2011) inclut des « *Guidelines for carbon conscious forest management* ». Parmi ces indications : « *The relation between rotation period and maximal carbon stock is complex. Carbon sequestration in forest biomass is a limited option because it can reduce the net CO2 emission only as long as the carbon stocks in a forest area are increasing. Saturation of biomass stocks will eventually take place, and the stock level must then be preserved to avoid any release of stored carbon. Increased harvesting from existing forests will lower the average growing stocks, and thus reduce susceptibility to storms, an adaptation measure. The most important factor for the whole system is to increase the increment and not the standing volume. Increment that increases over time, producing more harvestable wood that can be used, while maintaining or even expanding a substantial carbon stock in the forest, would be the best option* ».

Dans ce document G.J. Nabuurs remarque la nécessité de mener d'autres recherches afin de fournir plus d'éléments de réponse à ces questions : « *Would more intensive management be beneficial, or just the opposite? What is the economic and ecological effect of more intensive harvesting, slash harvesting, or stump removal (for bio energy) on carbon sequestration? What is the substitution effect of wood products, and*

---

<sup>65</sup> Ces projets n'incluent pas de reboisement et de déboisement évité.

*through what measures can it be stimulated? On the opposite: what if I let my forest naturally develop: will the medium term carbon sequestration be counteracted by more natural disturbances in the long term?».*

## **8. De quelle manière ces pratiques sont intégrées dans les documents de planification de la gestion forestière ? Ainsi que dans ceux des politiques publiques, par exemple dans les plans climat énergie territoriaux ? Selon vous, de quelle manière cette intégration pourrait être améliorée ?**

Plusieurs **types de documents** de gestion de la forêt ont été nommés par les acteurs.

Les orientations de gestion dans la forêt publique sont établies dans les documents les **Directives Régionales d'Aménagement (DRA)** et les **Schémas Régionaux d'Aménagement (SRA)**. Ces documents présentent des recommandations, entre autres, relatives aux choix des essences, aux traitements sylvicoles et aux critères d'exploitabilité.

Par rapport aux forêts privées nous faisons référence aux **Schémas Régionaux de Gestion Sylvicoles pour les forêts privées (SRGS)** ainsi qu'aux **plans simples de gestion** des propriétés forestières de plus de 25 ha.

Notons également comme documents de planification les **plans pluriannuels régionaux de développement forestier**.

Plusieurs acteurs font remarquer que ces documents ne font pas référence directement au bilan GES mais garantissent une gestion durable basée sur les connaissances actuelles. Ci-dessous, nous rapportons quelques commentaires évoqués par les acteurs afin d'obtenir une meilleure intégration :

### **a) Améliorer la connaissance de la ressource et ses utilisations :**

*« avoir une meilleure connaissance de la ressource et de ses utilisations au niveau local (cf. observatoire national de la biomasse, en cours de constitution) ».*

### **b) Toutes les parcelles forestières avec un plan de gestion :**

*« L'engagement pris dans des documents de gestion (PSG, RTG...) constitue pour certains propriétaires privés une réelle incitation à gérer leur patrimoine. Aussi, l'objectif devrait être «pas de parcelle forestière sans projet ». Il s'agit de rendre les acteurs de la filière forêt – bois plus réactifs en cas de besoin (tempête, adaptation des sylvicultures...) ».*

### **c) Promotion d'une forêt de production et de cohérence dans les stratégies territoriales :**

*« une politique de soutien à la sylviculture et de promotion d'une forêt de production est à encourager sauf dans les forêts anciennes à haut intérêt environnemental et à forte accumulation de carbone organique, ce qui n'est généralement pas le cas en France métropolitaine. » et « Il faudrait également plus de cohérence dans les stratégies territoriales : étant partisan d'une plus grande spécialisation des espaces, la réglementation environnementale, par exemple, est très souvent bloquante dans des espaces qui pourraient être dédiée à une production raisonnée et alors que les enjeux environnementaux ne sont pas très forts ».*

### **d) Mesures afin d'assurer la durabilité des récoltes :**

*« i) que l'exigence de rentrer dans les clous du 3 X 20 ne s'accompagne pas d'une moindre vigilance quand aux conditions pour que le bois énergie réponde efficacement à la problématique de la lutte contre l'effet de serre ;ii) que les difficultés de mobilisation du bois notamment dans la petite propriété forestière privée ne soient pas sous-estimées ».*

### **e) Nécessité de mener des études afin de clarifier quelle est la gestion optimale d'un point de vue carbone :**

*« bilan carbone de différents scénarios sylvicoles » afin que les propriétaires forestiers connaissent leur contribution à l'atténuation du CC et ainsi avoir plus d'éléments de décision sur la gestion de leur propriété ».*

*« création d'un indicateur carbone global pour la filière forêt bois afin d'évaluer la gestion de différents types d'itinéraires sylvicoles et d'utilisation du bois ».*

### **f) Formations des propriétaires et gestionnaires :**

« il existe un besoin de formation qui permettrait de clarifier parmi les propriétaires et gestionnaires le choix de la gestion forestière optimale. Actuellement, il existe une énorme confusion : favoriser le taillis à courte rotation ou des forêts anciennes ? ».

«concernant les pratiques pouvant favoriser les puits de carbone dans la gestion forestière, il est nécessaire, à minima, qu'elles soient intégrées dans les formations dispensées par les Centres Régionaux de la Propriété Forestière dans toutes les régions. Par ailleurs, les communes forestières doivent être davantage sensibilisées afin de faire valoir leurs attentes auprès de l'ONF, en charge de la gestion des forêts communales».

« nécessité de proposer des formations aux industriels du secteur du bois énergie car l'idée que la collecte du bois énergie en forêt contribue à un « nettoyage » positif pour la forêt est très répandu parmi eux. ».

#### **f) Incitations économiques pour les propriétaires forestiers :**

« le bénéfice carbone de la gestion forestière doit avoir des répercussions positives sur les propriétaires forestiers. le bénéfice est actuellement pour le secteur de l'énergie, qui ne comptabilise pas ces émissions, ou encore pour le secteur de la construction en bois, qui évite les émissions des autres matériaux énergétiques. Par contre, il n'y a pas actuellement pour les propriétaires privés de reconnaissance de leur contribution à l'atténuation du changement climatique. »

« création des chartes volontaires auxquelles les propriétaires privés peuvent adhérer en échange d'incitations ».

### **9. Selon vos critères, quelles sont les actions à mener sur les filières bois matériaux et bois énergie qui peuvent améliorer leur bilan GES ?**

Les principales idées évoquées par les acteurs afin d'améliorer le bilan GES de la filière bois sont :

#### **a) L'importance de la récupération et du recyclage du bois (utilisation du bois « en cascade ») :**

Plusieurs acteurs ayant participé à notre enquête (soulignent l'importance de la récupération et du recyclage des déchets de bois et du bois en fin de vie tout comme la structuration des filières de récupération.

Notons le commentaire : « l'utilisation du bois en cascade à savoir utiliser le bois d'abord comme matériau, avec autant de recyclage matière que possible, puis l'utiliser comme énergie. Il serait donc important de valoriser les tonnages de bois actuellement mis en décharge en France ».

#### **b) Meilleure efficacité énergétique et amélioration du rendement de l'utilisation du bois**

Certains acteurs listent plusieurs actions à mener afin d'améliorer le bilan GES des filières bois matériaux et bois énergie:

« i) une meilleure efficacité de l'exploitation forestière, ii) une meilleure efficacité énergétique au niveau de la première transformation et du séchage, ainsi que le basculement vers les énergies à faible intensité C (EnR) et notamment la plus évidente dans ce secteur, le bois énergie ; iii) l'augmentation des rendements de première et de seconde transformation, iv) une réduction de l'utilisation des colles à base de ressources fossiles, v) la réduction ou le changement des modes de transport ».

« i) Retour au bois massif, ii) Actions en faveur du séchage naturel des bois au lieu du séchage artificiel, iii) Modernisation des lignes de sciage de feuillus (rendement matière, découpes, optimisation...) ».

#### **c) Coordination entre les filières en aval et en amont, utilisation du bois local et la promotion de la transformation nationale :**

« Il s'agit de considérer la filière dans son ensemble. Inciter à la vente de bois sans coordination avec les filières en aval conduit à de mauvaises pratiques comme vendre du bois qui sera transformé en Chine et finalement consommé en France. Ceci présente un bilan carbone que l'on peut évidemment améliorer par une transformation sur place si celle-ci devient compétitive ».

#### **d) Limiter la filière bois énergie à des projets fonds chaleur au niveau local :**

« Les projets fonds chaleur au niveau local peuvent s'approvisionner localement sans rentrer en compétition avec des filières bois matériau traditionnelles et ont de bons rendements comparés aux projets électrogènes. De plus, ces projets contribuent au développement rural ».

D'autres personnes remarquent l'importance de la

consommation de bois local afin de réduire les conflits sociaux : « la population comprend mieux les récoltes de bois en forêt si au lieu d'être transportées vers un destinataire inconnu ces récoltes sont utilisées pour chauffer l'école ». Il porte également notre attention sur le danger d'une : « désincarnation des usages de la forêt ».

#### **e) Limiter la filière bois énergie aux installations ayant une haute efficacité énergétique**

*« des unités produisant simultanément de la chaleur et de l'électricité (cogénération), dès lors que leur efficacité énergétique est suffisante, présentent des avantages supérieurs aux installations produisant uniquement de la chaleur dans la mesure où (i) elles fonctionnent en général de manière quasi-continue (et fournissent de ce fait plus d'énergie renouvelable que les installations liées à des réseaux de chaleur) (ii) par leur taille plus importante, elles ont une incitation à structurer leurs approvisionnements. »*

#### **f) Diminuer la consommation énergétique :**

*« nous devons avant tout améliorer les isolations plutôt que chauffer plus dans une maison mal isolée ».*

#### **g) Innovation et développement de nouvelles utilisations du bois dans la construction et la chimie du végétal et les biocarburants de seconde génération :**

*« il faudrait également très largement promouvoir l'innovation et le développement du bois matériau pour augmenter les effets de substitution et de stockage « matériau ».*

*« les biocarburants de seconde génération à partir de bois ont l'avantage d'avoir de bons bilans en matière de gaz à effet de serre (notamment parce que la sylviculture utilise peu d'intrants, à la différence de l'agriculture) et de ne pas conduire à un épineux problème de conflit d'usage avec les matières premières alimentaires (comme c'était le cas pour la première génération). »*

#### **h) Promotion de produits bois qui se substituent à des produits plus énergétivores :**

*« il faut promouvoir les produits en bois qui se substituent à des produits faits à partir de matériaux qui demandent une grande consommation d'énergie, notamment fossile, pour leur transformation »*

#### **i) Projets de recherche afin de récupérer du CO<sub>2</sub> dans les chaudières :**

*« Il faut améliorer les connaissances afin de rendre possible des projets de récupération du CO<sub>2</sub> dans les chaudières. »*

#### **f) Répartition de la rente et mesures :**

*« Répartition de la rente, lien avec l'ETS. Néanmoins, ne pas oublier que la filière est peu réactive aux marchés et à la politique publique, notamment du fait de son atomisation ».*

### **10. De quelle manière ces actions sont intégrées dans les politiques publiques, par exemple dans les plans climat énergie territoriaux ? De quelle manière cette intégration pourrait être améliorée ?**

Ci-dessous, nous rapportons les principales idées évoquées par les acteurs afin d'obtenir une meilleure intégration des mesures sur le bilan GES de la filière bois dans les politiques publiques.

#### **a) Intégration de la forêt dans les PCET de façon globale et non seulement sur la prise du bois énergie et intégration des experts sylvicoles dans le développement des PCET :**

*« il semble qu'actuellement, les bénéfices de la forêt ne soient envisagés, dans les PCET en particulier, que par le prisme du bois énergie. Par ailleurs, les PCET réalisés par des non experts sylvicoles, qui plus est si ceux-ci n'ont pas une connaissance approfondie des spécificités locales, se fondent sur des lieux communs voire des rumeurs. Une piste d'amélioration pourrait provenir d'un développement des analyses et bilans locaux des pratiques, en lien avec les acteurs de la filière forêt-bois. »*

#### **b) Promotion de la filière bois matériau :**

Plusieurs acteurs ont mentionné l'importance de mettre en œuvre des mesures afin de promouvoir la filière bois matériau et le développement de l'utilisation du bois dans la construction.

Certains acteurs remarquent qu'actuellement il n'y a pas une intégration des politiques bois matériaux et bois énergie. Ces dernières années, des politiques de promotion du bois énergie ont été conduites mais, en revanche, le bois matériau n'est pas suffisamment promu.

### **c) Mesures pour sécuriser l'approvisionnement de la filière bois**

*« pour une part de ces objectifs, il faudrait rendre plus compétitives les entreprises de la première transformation notamment en sécurisant leur approvisionnement (inciter à développer l'offre de bois économiquement pertinente : coordination des ventes pour obtenir des chantiers supérieurs à 4 ha, tri des bois en lots homogènes...) ».*

*« renforcement de la filière : contrats d'approvisionnement, desserte, logistique ».*

Afin de pallier les effets du morcellement sur la mobilisation du bois, il a été souligné l'importance de l'établissement de mesures afin de favoriser la création de coopératives forestières dans les collectivités locales.

### **d) Modernisation des industries de transformation :**

Nous soulignons les conclusions des rapports « Prospective sur le marché actuel des nouveaux produits issus du bois et des évolutions à échéance 2020 » (PIPAME, 2012) et « Meilleure valorisation de la ressource forestière sous forme de sciages » (Roy C. et Magrum M. 2012, CGAAER n°10156) qui remarquent l'importance de la modernisation des industries de première et deuxième transformation de bois.

### **e) Nécessité de mener des études afin de déterminer les bénéfices CO<sub>2</sub> des différents types de produits bois et des distances de transport :**

*« conduire des analyses de cycle de vie de chaque produit bois en prenant en compte la gestion de la forêt afin de mieux quantifier les effets substitution des produits bois matériaux. Faire savoir quel produit apporte le plus d'avantages. ».*

*« à partir de quelle distance de transport les produits bois apportent-ils des bénéfices ? ».*

### **f) Label « empreinte carbone » sur les produits bois :**

*« création d'un label « empreinte carbone » sur les produits bois afin de générer des incitations économiques sur les produits bois par rapport à d'autres matériaux plus énergivores afin de contribuer à la dynamisation économique de la filière bois ».*

## **11. Quels sont les travaux et actions que votre organisation mène dans ce domaine ?**

Nous allons nous restreindre ici aux travaux de recherche sur le bilan GES de la « filière forêt bois » qui ont été mentionnés par les acteurs enquêtés.

L'un des projets les plus importants nommé fut le projet CARBOFOR (2002-2005). Ce projet a étudié les impacts du changement climatique sur les forêts en termes de production, de stockage de carbone et de vulnérabilité aux maladies. Il s'agit d'un consortium de recherche rassemblant 14 partenaires et regroupant les principaux organismes de recherche français impliqués dans cette thématique: INRA, CNRS, Universités, CIRAD, Météo-France-CNRM, CEA, IFN.

Notons également l'étude « Projections d'émissions/absorptions de gaz à effet de serre dans les secteurs forêt et agriculture aux horizons 2010 et 2020 » (Convention INRA-MAP, 2008).

Plus, nous pouvons citer les travaux menés par :

**Le Laboratoire d'Economie Forestière (LEF) :** Développement du « French Forest Sector Model » (FFSM). Bilan carbone des politiques publiques forestières dans le cadre de la thèse de Sylvain S. Caurila dirigée par P. P. Delacote (LEF) (2012). Le projet ORACLE (Opportunités et Risques pour les Agro-écosystèmes et les forêts en réponse aux changements CLimatique, socio-économiques et politiques en France et en Europe).

**Le Laboratoire d'Etude des Ressources Forêt-Bois (LERFoB) :** thèse conduite par Patrick Vallet (actuellement à l'IRSTEA) (2005) et dirigée par J.R. Dhôte (ONF) sur le bilan carbone de différentes stratégies sylvicoles (capitalisation sur pied et substitution d'essences). Travaux menés par Nicolas Robert et ultérieurement Mathieu Fortin sur la mise au point d'outils permettant de dresser le bilan carbone de peuplements et de massifs forestiers en fonction de la sylviculture qu'on y pratique.

**L'INRA, Centre de Bordeaux :** coordinateur de la Plate-forme XYLOSYLVE qui vise à évaluer l'équilibre environnemental de systèmes de production intensifs de bois et de biomasse ligneuse. C'est l'un des six plateaux techniques du projet d'Investissement d'Avenir Equipe x XYLOFOREST.

**Le GIP ECOFOR :** animateur des projets sur la biomasse et la biodiversité forestières (BIOMADI / BIO2/FORGECO).

**La CdC Climat** : Recherche publique et animation du Club Carbone Forêt-Bois où est menée une réflexion autour de la valorisation de la séquestration carbone par la filière forêt-bois en France via les marchés du carbone.

**FCBA** : de nombreuses actions sont menées par le FCBA dans ce domaine ; projets de recherche et projets de consultance privée :

- l'utilisation des TIC (SIG pour l'optimisation des transports et la traçabilité des bois, RFID<sup>66</sup> sur les grumes, etc.) afin d'améliorer l'efficacité de l'exploitation forestière et de la première transformation (Projet Indisputable Key) ;
- des audits énergie réalisés en scierie (projets communs aux CTI) ;
- le projet Européen ECOINFLOW pour l'amélioration de la performance énergétique en scierie ;
- l'augmentation du taux d'abattage mécanisé (projet sur la conception d'une tête d'abattage de feuillu ECOMEF) ;
- des recherches sur l'amélioration de la performance thermique des maisons à ossature bois ;
- la réalisation de bilans carbone et de profils environnementaux de produits bois (FDES), ACV de productions énergétiques (TCR, granulés) ;
- l'éco-conception de produits bois ;
- le projet européen DEMOWOOD pour l'augmentation de la valorisation des déchets bois en recyclage matière et en énergie ;
- des travaux ont aussi été menés pour quantifier les variations de stocks de C dans les produits bois, pour définir des règles de comptabilité du C biomasse des produits bois dans les ACV et notamment intégrer le stockage de C biomasse des produits dans leur empreinte C, pour établir une base de données ACV sur la sylviculture, l'exploitation forestière et les productions de sciages français ».

Nous pouvons également souligner que l'ONF a été impliqué dans plusieurs travaux menés par le LEF et le LERFoB. Forêt Privée Française est également impliquée dans des projets menés par le LERFoB.

L'ONF mène également des recherches sur des plantations très productives afin de répondre à l'approvisionnement en bois en cas de forte demande. Plantation productives de Douglas (*Pseudotsugamenziesii*), Epicéa commun (*Picea abies*) et Cyprès (*Cupressus cyparis*) et Taillis à courte rotation de saule (*Salix alba*) et robiniers (*Robinia pseudoacacia*).

---

<sup>66</sup> Radio Frequency Identification, Identification par Radio Fréquence en français.

## 12. Selon vous, quels sont les besoins de travaux à mener pour la mise en place de stratégies forestières climat et énergie optimisées et cohérentes entre elles?

Les principales idées rapportées par les acteurs interrogés ont déjà largement été intégrées aux réponses des questions 8 et 10 de notre enquête.

Nous soulignerons encore une fois que la majorité des personnes interrogées s'accordent sur l'importance de mener des travaux de recherche afin de mieux connaître le bilan GES de la filière forêt bois selon différentes pratiques de gestion forestière et usages du bois, à différents horizons de temps et à différentes échelles territoriales (l'unité de gestion forestière, du massif forestier, d'une région ainsi qu'au niveau national). Ces études permettraient d'évaluer le bilan GES des politiques impactant la forêt.

Notons aussi que plusieurs acteurs ont remarqué la nécessité de la prise en compte de l'importation du bois dans ces études si une augmentation de la demande du bois au niveau national n'est pas accompagnée d'une augmentation du prélèvement sur le territoire. Ils mettaient également en avant l'importance de prendre en compte les risques en forêt.

Par ailleurs, certains acteurs remarquent la nécessité d'approfondir les connaissances de la filière en quantifiant plus précisément les flux de biomasse entre la ressource et le consommateur ainsi que d'évaluer l'impact du transport selon différentes distances d'approvisionnement et modes de transport.

Enfin, l'importance de la recherche sur la réponse des forêts (notamment méditerranéennes) aux changements climatiques (réponse à la tendance et réponses face aux événements extrêmes) a été également remarquée.

### 1.3 Conclusions générales de l'enquête

Les acteurs avec lesquels nous nous sommes entretenus lors de cette enquête se positionnent de façons différentes autour de la question : « Comment optimiser la contribution de la forêt française métropolitaine et ses filières bois matériau et bois énergie à l'atténuation du changement climatique ? ».

Certains entre eux promeuvent une dynamisation de la sylviculture qui permettrait de fournir une quantité supérieure de biomasse pour tous les usages (bois matériaux et bois énergie). Cette dynamisation a pour but d'assurer les stocks de carbone actuels *via* une diminution des risques et une meilleure adaptation au changement climatique. Cette dynamisation permettrait également de générer des effets substitution matériaux et énergétique et de rendre la filière bois dynamique et compétitive.

En revanche, d'autres acteurs, mettent en doute le fait que l'intensification de l'exploitation forestière puisse contribuer à l'atteinte de ces objectifs. D'une part, certains acteurs considèrent que la gestion de risque ne justifie pas une augmentation générale du niveau de prélèvement. D'autre part, des acteurs mentionnent des études scientifiques soulignant que les diminutions de stock de carbone dans les écosystèmes liées à l'intensification ne sont pas compensées par les effets substitution qu'à long terme. Ces derniers acteurs promeuvent une gestion sylvicole de production du bois de qualité (gros bois) qui permettrait un stockage de carbone en forêt élevé et, ultérieurement, un stockage dans les produits bois. Ils insistent sur l'idée de ne pas dissocier la filière bois énergie de la filière bois matériaux. Certains parmi eux nous alertent sur la pression que la filière bois énergie pourrait générer sur la forêt, les paysages ruraux et les autres filières bois *via* la promotion du changement des pratiques sylvicoles traditionnelles.

Plusieurs acteurs s'accordent sur l'idée que la stratégie optimale est l'utilisation du bois en cascade : *utiliser le bois d'abord comme matériau, avec autant de recyclage matière que possible, puis l'utiliser comme énergie.*

Parmi les acteurs enquêtés, **il est important de souligner qu'il n'existe pas de consensus sur les pratiques sylvicoles optimales vis-à-vis de l'atténuation du changement climatique.** Les stratégies peuvent même être complètement opposées par l'arbitrage entre l'effet de substitution et l'effet de stockage (de la dynamisation de la sylviculture, le raccourcissement des révolutions, le façonnement de peuplements moins denses et la mise en place de plantations très productives ou de pratiques qui promeuvent l'allongement de l'âge de coupe, le maintien des forêts denses ou la création de zones de réserves).

**Les mesures afin d'améliorer le bilan GES dans la filière bois sont plus consensuelles.** Les acteurs reconnaissent l'importance de la promotion du recyclage du bois, de l'utilisation du bois local, comme de la modernisation de la filière (amélioration de l'efficacité énergétique, réduction de la consommation énergétique, lutte contre l'atomisation, etc.).

En relation avec la neutralité de la filière bois énergie, nous avons obtenu des positions très disparates. Plusieurs acteurs considèrent que la filière peut être considérée comme carbone neutre à condition que via une gestion durable des forêts, le stock forestier se maintienne dans le temps. D'autres acteurs ne considèrent pas la filière comme carbone neutre car la filière génère des émissions temporaires, produit une décapitalisation en forêt sans stockage dans les produits et l'hypothèse de la neutralité masque l'efficacité énergétique réelle des processus de combustion et de production de la filière bois énergie. D'autres acteurs encore évaluent la neutralité par rapport à d'autres systèmes fossiles ou font remarquer que la filière peut être carbone positive selon l'échelle de temps et d'espace et en considérant la distance du transport du bois.

Vis-à-vis de la collecte de menu bois, toutes les personnes interrogées ont conscience de la coexistence des effets positifs (indépendance énergétique, emploi, etc.) et négatifs qui pourraient découler de leur collecte. Parmi les effets négatifs sont nommés : la perte de biodiversité, le tassement des sols et la perte de fertilité et de carbone dans le sol. Toutefois, tandis que certains acteurs considèrent que du fait de ces effets la collecte de rémanents ne doit pas être encouragée, d'autres considèrent que des mesures et une régulation appropriées peuvent pallier ces effets négatifs.

Pour terminer, soulignons que la majorité des acteurs interrogés s'accordent sur l'importance de mener des travaux de recherche afin d'améliorer nos connaissances sur le bilan GES de la filière forêt bois selon différentes pratiques de gestion forestière et d'usages du bois, mais aussi sur l'importance d'une meilleure quantification de l'effet substitution des produits bois matériaux.

## Bibliographie

Caurla S. , 2012. Modélisation de la filière forêt-bois française: Évaluation des impacts des politiques climatiques. Thèse de doctorat, AgroParisTech.

Deheza M. et Bellassen V., 2010. Valorisation carbone de la filiere forêt-bois en France. Etude Climat n°20, CDC Climat Recherche.

Dhôte J.F., 2010. Comment la forêt et les forestiers peuvent-ils contribuer à la lutte contre le changement climatique ? Assemblée Générale de la SRFB, Bruxelles, 31 mars 2010

Dhôte J.F., 2012. Adaptation, mitigation and ecosystem services – Challenges to sustainable forest management and research needs. Conférence Internationale, Faire face au changement climatique : la contribution de la science forestière. 21 – 24 May, 2012.

EUSTAFOR, 2011. European Forestry in the Face of Climate Change. EUSTAFOR Guidelines.

Forêt Privée Française, Chambre d'agriculture Maine et Loire et Mission Bocage, 20012. Evaluation du Potentiel de capture carbone du territoire boisé (Forêt et Bocage). Document non publié.

Fortin M., Ningre F. et Robert N., 2011. Le carbone et les futaies de chêne : Quelle gestion adopter ? . Atelier Recherche & Gestion forestière. "Les services écosystémiques rendus par les forêts" ? Champenoux, 14-16 juin 2011.

Ginisty C., Vallet P., Chevalier H. et Colin A., 2011. Disponibilités en biomasse ligneuse en forêt, dans les peupleraies et dans les haies pour les différents usages du bois. Rev. For. Fr. LXIII 2, pp. 151-161

Hudiburg T.W., Law B.E., Wirth C. et Luysaert S, 2011. Regional carbon dioxide implications of forest bioenergy production. Nature Climate Change, 1, pp. 419-423.

Lecocq F., Caurla S., Delacote P., Barkaoui A. et Sauquet A., 2011. Paying for forest carbon or stimulating fuelwood demand? Insights from the French Forest Sector Model. Journal of Forest Economics, 17 (2), pp. 157-168.

Nabuurs G.J., Thurig E., Heidema N. , Armolaitis K., Biber P., Cienciala E., Kaufmann E. , Makipaa R., Nilson P., Petritsch R., Pristova T., Rock J. , Schelhaas M.J., Sievanen R., Somogyi Z. Et Vallet P., 2008. Hotspots of the European forests carbon cycle. Forest Ecology and Management 256, pp. 194–200.

Peyron J.L. et Yvon P., 2011. Pour une gestion forestière et une filière forêt-bois multifonctionnelle ( économiquement efficaces, écologiquement viables, socialement acceptables). Rapport rédigé à la demande du ministère de l'Ecologie, du Développement durable et de l'Energie.

PIPAME, 2012. Prospective sur le marché actuel des nouveaux produits issus du bois et des évolutions à échéance 2020.

Vallet P., 2005. Impact de différentes stratégies sylvicoles sur la fonction « puits de carbone » des peuplements forestiers. Thèse de doctorat, ENGREF.

Roy C. et Magrum M., 2012. Meilleure valorisation de la ressource forestière sous forme de sciages. CGAAER n°10156.

Ruter S., Rock J., Köthke M. et Matthias Dieter M., 2011. CO2 bilanzenunterschiedlichernutzungsszenarien 2013 bis2020 :wiefielholznutzung is gut furs Klima. AFZ-DerWald 15, pp.19-21.

Werner F., Taverna R., Hofer P., Thurig E. et Kaufmann E., 2010. National and global greenhouse gas dynamics of different forest management and wood use scenarios: a model-based assessment. Environmental Science and Policy, 13 (1), pp. 72-85.

# Conclusion

Dans ce travail, nous avons conduit une analyse critique des stratégies d'atténuation du secteur forestier en France métropolitaine à travers une revue de la littérature scientifique internationale à laquelle est venue s'ajouter une enquête menée auprès des principaux acteurs nationaux<sup>67</sup>.

Le travail que nous avons conduit s'inscrit dans ce débat : « **Stratégie de stockage versus stratégie de substitution** ». Nous avons principalement abordé la question de l'augmentation du niveau de prélèvement : **est-ce qu'une intensification de l'exploitation forestière<sup>68</sup>, pour la filière bois dans son ensemble ou ciblée pour la production d'énergie, peut contribuer à atténuer le changement climatique ?**

Notre revue de la littérature nous permet de tirer une **première conclusion**. Afin de déterminer l'incidence qu'une augmentation de la récolte peut avoir sur le climat, il est **fondamental de bien définir le périmètre considéré dans l'analyse**. Le bilan GES de la filière forêt bois doit prendre en compte d'une part (a) l'incidence que la récolte du bois a sur le stock de carbone forestier et, d'autre part, (b) le stock de carbone dans les produits bois et les émissions évitées *via* l'utilisation de bois énergie ou par le remplacement des matériaux énergétivores. Tous ces éléments sont de plus interconnectés dans de **complexes échelles temporelles et spatiales**. Les études ne prenant pas en compte tous ces éléments peuvent arriver à des résultats incomplets du fait de l'arbitrage entre les effets de stockage et de substitution, et donc à des résultats contradictoires en apparence.

La principale remarque qui émerge de cette première conclusion est qu'**il est fondamental de prendre en compte l'incidence que la récolte du bois a sur les stocks de carbone forestier. Le principe de la neutralité du carbone ne doit pas être pris comme postulat préliminaire dans le processus d'évaluation du bénéfice global en terme de CO<sub>2</sub> de l'utilisation des produits bois**. Certains auteurs soulignent que ce principe de neutralité du carbone, plutôt que d'assurer une réduction de la concentration du carbone dans l'atmosphère, peut conduire à une transmission des émissions du secteur de l'énergie au secteur de la gestion forestière.

Nous avons donc analysé tous ces éléments afin d'évaluer les bénéfices globaux.

D'une part (a), **la mise en exploitation d'une forêt non gérée ou l'augmentation de son niveau de récolte entraîne, en l'absence de techniques d'augmentation de la production de la biomasse ou d'évènements extrêmes, une diminution du stock de carbone dans les écosystèmes forestiers (biomasse et sol) par rapport à celui qui aurait été obtenu en l'absence de la mise en exploitation ou d'intensification de la récolte. Il faut noter que cette variation de stock de carbone dans les écosystèmes peut se stabiliser** si les facteurs suivants sont réunis : i) le prélèvement est inférieur au taux d'accroissement ; ii) il n'y a pas de diminution de la capacité productive ; iii) il n'y a pas de perte de carbone du sol ; iv) il n'y a pas de perte liée à un évènement extrême.

D'autre part (b), les produits bois provenant de la récolte génèrent :

(b<sub>1</sub>) Un stock de carbone temporaire dans les produits bois. Il faut remarquer que le stock de carbone dans les produits atteint une limite qui dépend fortement de la durée de vie moyenne des produits et que le réservoir de carbone dans les produits bois est beaucoup moins important que celui des écosystèmes forestiers.

(b<sub>2</sub>) Des émissions évitées *via* le bois énergie ou par remplacement des matériaux énergétivores. Les effets substitution matériau et substitution énergétique n'atteignent pas de limite comme l'effet stockage dans les écosystèmes ou dans les produits. Ces effets substitution sont cumulatifs<sup>69</sup> car si les produits bois ne sont pas utilisés, alors il y a une émission fossile constante pour la production d'autres produits non ligneux ou pour la

---

<sup>67</sup> Notons que cette enquête a été limitée aux seuls experts nationaux impliqués dans des travaux sur la relation entre la filière forêt bois et le carbone.

<sup>68</sup> Cette intensification du niveau de prélèvement étant due soit à l'augmentation du niveau de récolte du bois soit à la collecte des rémanents auparavant laissés dans les écosystèmes.

<sup>69</sup> A un niveau constant de consommation d'énergie et des produits matériaux.

production d'énergies à travers d'autres systèmes fossiles. Il faut aussi remarquer que, même si les effets substitutions peuvent être d'une grande importance par leur caractère cumulatif, **les valeurs de ces effets sont très variables selon la caractéristique de la filière bois et des conditions de chaque pays. Dans le cas d'un effet substitution matériau, les valeurs de ces effets dépendent fortement des modes de construction de chaque pays. Dans le cas de la France, il existe peu d'études précises et cette situation rend difficile les estimations des valeurs de substitution matériau. Les effets substitution énergétique sont plus facilement estimables.** Ils dépendent principalement de l'intensité GES du mix énergétique substitué<sup>70</sup>, de l'efficacité de la combustion du bois et du niveau des émissions de la chaîne de production du bois énergie (émissions liées à la gestion de la forêt, aux distances de transport et à la transformation du bois).

Lorsque l'on évalue le bénéfice global en ajoutant tous les facteurs (substitution et stockage), nous pouvons remarquer que **le bénéfice illimité provenant des effets substitution peut donc compenser les émissions liées à la variation initiale de stock de carbone dans les écosystèmes dans une période de temps très variable selon les conditions du territoire (productivité des essences cultivées, type de sol, antécédents culturels, risques d'événement extrême, climat, etc.), le type de gestion forestière (niveau de prélèvement, type de coupe, utilisation de techniques d'augmentation de la production, etc.), la distribution de la récolte entre les différents usages du bois et les valeurs du coefficient de substitution énergétique et matériaux.**

Par ailleurs, lorsque l'on cible l'analyse sur une intensification du niveau du prélèvement de bois en forêt pour des fins énergétiques, alors l'évaluation du bénéfice global se réduit à l'évaluation des émissions liées à la variation initiale de stock de carbone dans les écosystèmes liées au prélèvement du bois et aux bénéfices apportés par les effets de substitution énergétique. Il est donc aussi nécessaire de déterminer à partir de quel moment l'effet de substitution compense ces émissions nettes liées à la récolte.

Notre revue de la littérature nous a permis de dégager une **deuxième conclusion.**

**Une intensification du niveau de prélèvement pour une utilisation croissante du bois dans la construction et l'habitat ou pour la mise en place d'une filière bois énergie donne généralement des bénéfices en termes de bilan GES à moyen et long terme. En revanche, à court terme, une intensification du niveau de prélèvement peut conduire à une augmentation transitoire des émissions.**

Notons que certains auteurs soulignent que pour conduire une évaluation de l'impact dans le temps de cette augmentation temporaire des émissions de CO<sub>2</sub>, il est nécessaire de tenir compte de sa durée de vie dans l'atmosphère. Ces auteurs suggèrent l'utilisation d'indicateurs comme le potentiel de réchauffement mondial<sup>71</sup>(GWP)<sup>72</sup> afin de mieux évaluer l'impact de ces émissions sur le climat. **L'utilisation de ces indicateurs conduit généralement à ce que les scénarios d'augmentation du niveau de prélèvement génèrent des bénéfices dans des périodes de temps plus longues. Par ailleurs, d'autres auteurs soulignent que les évaluations ne prenant pas en compte les effets biophysiques des forêts sur le climat (notamment l'albedo et les transferts de chaleur *via* l'évapotranspiration) peuvent également conduire à des résultats incomplets.**

Comme nous l'avons décrit précédemment, le débat relevé par la littérature scientifique se focalise sur l'arbitrage entre les stratégies à long et à court terme. Les questions qui se posent sont les suivantes : Comment concilier les stratégies à long et court terme ? Les auteurs qui promeuvent une intensification de la gestion mettent l'accent sur les quantités beaucoup plus faibles de carbone qui seront éventuellement émises dans l'atmosphère à long terme. Dans cette perspective, la question n'est plus « combien émet-on annuellement ? » mais devient « quelle sera notre émission totale dans le temps ? ». Toutefois, les auteurs qui remettent fortement en question le bénéfice d'une augmentation du niveau de récolte se posent les questions suivantes : « Comment ces émissions supplémentaires peuvent affecter le climat ? », « Quels sont

---

<sup>70</sup> Le mix énergétique en France est moins GES - intense que dans les autres pays européens. Mix énergétique du secteur du logement en 2008 : 40 % d'électricité (dont 80 % nucléaire), 40 % de gaz naturel et de charbon, 20 % de pétrole et d'autres gaz.. Il faut noter que le mix énergétique du secteur de l'électricité est encore moins GES – intense. Cela est lié à la grande proportion de l'énergie nucléaire et hydraulique : 74 % nucléaire, 12 % hydraulique, 11 % thermique et 2,7 % autres (éolien, photovoltaïque et autres renouvelables).

<sup>71</sup>Potentiel de réchauffement mondial (GWP) : Indice, décrivant les caractéristiques de radiation de gaz à effet de serre bien mélangés, représentant l'effet combiné de la durée de vie de ces gaz dans l'atmosphère et leur efficacité relative pour absorber le rayonnement infrarouge sortant. Cet indice donne l'approximation de l'effet de réchauffement dans le temps d'une masse unitaire d'un gaz à effet de serre donné dans l'atmosphère, par rapport à celui du dioxyde de carbone. (FAO, 2009).

<sup>72</sup>GWP, par son abréviation en anglais (Global WarmingPotential).

les événements climatiques qui pourraient être induits par cette augmentation ? », « Comment répartir et mesurer l'effet d'une augmentation des émissions à court terme avec les bénéfices à long terme ? ».

Lors de notre **enquête**, nous avons constaté que parmi les experts sur cette thématique dans le secteur forestier français, **il existait également un débat autour de la question de la gestion optimale de la forêt vis-à-vis de l'atténuation du changement climatique**. La plupart de ces acteurs sont conscients du débat scientifique international et de la complexité de la thématique. Néanmoins, ce débat ne se limite pas aux questions liées au carbone et ne se centre pas forcément sur les avantages des stratégies à long ou à court terme. **Il est donc important à remarquer que n'existe pas de consensus sur les pratiques sylvicoles optimales vis-à-vis de l'atténuation du changement climatique**. Les stratégies peuvent même être complètement opposées pour cet arbitrage entre l'effet de substitution et l'effet de stockage. Les personnes qui soutiennent une **mobilisation accrue de la biomasse forestière considèrent que c'est la meilleure option, même à court terme**. Ils apportent certains arguments en dehors du bénéfice de l'effet substitution : **la dynamisation donne de la flexibilité afin de mieux adapter les pratiques sylvicoles au changement climatique et de permettre d'assurer les stocks de carbone en forêt via une diminution des risques ; une plus forte utilisation des ressources forestières nationales permettrait de limiter les importations<sup>73</sup> ce qui limiterait une intensification de l'exploitation forestière en dehors du territoire national (où il peut y avoir moins de garanties pour assurer la durabilité de la récolte) et réduirait l'impact du transport**. Ils ont également souligné les avantages au niveau socioéconomique à travers **la mise en place d'une filière bois plus dynamique et compétitive, la création d'emplois et l'indépendance énergétique**. En revanche, d'autres acteurs (notamment les représentants des ONG et certains chercheurs) sont plus réticents quant à certains types d'intensification mais ne se positionnent pas forcément contre le prélèvement du bois. Ils remarquent que la gestion forestière ne doit pas tant rechercher une augmentation absolue du volume de la production de bois mais plutôt une augmentation du volume du bois de bonne qualité (gros bois). Ils soulignent également les difficultés de mobilisation<sup>74</sup> de la biomasse sur une partie importante du territoire français, ce qui induira une concentration de la demande dans les zones les plus facilement exploitables, et une compétition entre les différents usages du bois qui pourrait générer des problèmes sociaux, des risques de pratiques non durables au niveau environnemental (perte de biodiversité, tassement des sols, augmentation du stress hydrique) ou encore la diminution de la productivité en forêt liées aux effets liés au changement climatique ou à la perte de fertilité des sols.

En **conclusion**, nous pouvons et devons souligner **qu'il n'existe pas « une » solution optimale et unique qui réponde à la question : est-ce qu'une intensification de l'exploitation forestière peut contribuer à atténuer le changement climatique ?** Certaines intensifications peuvent conduire dans certains endroits et pour certains types d'usages à des bénéfices dans une période de temps compatible avec les objectifs de réduction des émissions fixés au niveau mondial. En revanche, il est très important de remarquer qu'il y aura d'autres prélèvements de bois dans la forêt, tant pour la génération d'énergie que pour la promotion d'autres usages du bois, qui offriraient des avantages au niveau du bilan GES dans des horizons de temps très longs. Dans les conditions technologiques actuelles<sup>75</sup>, ils ne doivent pas être encouragés. **Les conditions pour réduire le temps où le bilan devient positif** sont multiples et **complexes et ne se limitent pas uniquement à assurer la régénération après la coupe ou à ce que le taux de prélèvement reste inférieur à l'accroissement**.

A partir de notre revue de la littérature et des idées évoquées par les acteurs lors de notre enquête, nous pouvons suggérer **quelques pistes sur les conditions nécessaires pour qu'une mobilisation accrue de bois puisse apporter des bénéfices dans un horizon de temps plus court**.

En amont, nous devons remarquer que les **pratiques sylvicoles menées auront une grande influence**. Des études scientifiques suggèrent :

- **Limiter l'impact sur les stocks de carbone des sols, en évitant, par exemple, le labour, la coupe rase, le dessouchage ou encore la collecte intensive de rémanents sur sols sensibles.**

---

<sup>73</sup> La France a une balance commerciale déficitaire en produits bois.

<sup>74</sup> Difficultés techniques (inaccessibilité, coûts de mobilisation, nature des bois et produits forestiers), réglementaires (réglementation environnementale, réserves intégrales), structurelles (morcellement) et patrimoniales (valeur patrimoniale des forêts).

<sup>75</sup> Les avantages relatifs peuvent changer dans le futur avec les progrès technologiques dans la filière bois, ou avec l'augmentation attendue de l'intensité des GES de l'extraction des combustibles fossiles.

- Une **sylviculture de « couverture continue »** *via* la **transformation de futaies régulières<sup>76</sup> en futaies irrégulières<sup>77</sup>** ce qui pourrait entraîner une plus grande complexité lors de la gestion forestière mais qui permet de maintenir un stock de carbone en forêt stable au niveau de la parcelle.
- La **conversion des taillis simples en futaies ou taillis-sous-futaie** qui maintiennent un stock de carbone en forêt plus important.
- Selon les caractéristiques du territoire et les niveaux et types des risques des événements extrêmes, une **sylviculture de prévention des risques**, afin d'obtenir des masses plus stables, moins exposées aux aléas climatiques (traitements préventifs de lutte contre les incendies de forêt, coupes sanitaires, coupes pour favoriser le développement de certaines espèces plus adaptées à la station écologique).
- **Techniques d'augmentation de la production de la biomasse** comme : l'amélioration du matériel génétique, le remplacement par des espèces plus productives<sup>78</sup>, la fertilisation<sup>79</sup>, la surdensification<sup>80</sup>.
- Mener des **intensifications de prélèvements seulement dans les zones les plus productives tout en préservant les forêts très anciennes avec une grande quantité de biomasse sur pied et une faible productivité**. En effet, la perte du stock de carbone dans les écosystèmes liées à la mise en exploitation de ces forêts serait très longue à compenser.

En aval, nous devons promouvoir l'utilisation du bois avec une efficacité maximale :

- **Utilisation du bois en cascade** : utiliser le bois d'abord comme matériau (afin d'obtenir un stockage dans les produits et un effet substitution matériau) avec autant de recyclage matière que possible, puis utiliser les déchets et sous-produits du bois (produits connexes de scierie, produits de bois en fin de vie, etc.) comme source d'énergie.
- **Amélioration de l'efficacité énergétique et des rendements de la chaîne de transformation du bois** (meilleure efficacité de la exploitation forestière, des industries de première et seconde transformation, du séchage) **et de systèmes de valorisation énergétique issus du bois** (améliorer le rendement des appareils de combustion du bois et leur efficacité énergétique, améliorer les isolations des bâtiments).
- **Substitution à des systèmes constructives et produits matériaux plus énergétivores et aux énergies fossiles plus émettrices**
- **Limiter l'impact environnemental du transport**. Notons que le rayon d'approvisionnement de la biomasse et le moyen de transport choisi influent sur le bilan GES.

Dans le cadre de la génération d'énergie, ces facteurs peuvent faire que des projets chaleurs de moindre envergure apportent plus rapidement des bénéfices que des projets de production d'électricité de grande envergure liés : i) au plus faible rendement et/ou efficacité énergétique de ces derniers projets, ii) au besoin plus élevé du bois ce qui peut conduire au transport du bois sur de grandes distances, et iii) au fait que le mix énergétique du secteur électrique est moins émetteur que le mix énergétique du secteur du logement.

Pour finir, nous souhaiterions remarquer que les conclusions de ce mémoire peuvent avoir des implications sur les politiques forestières et énergétiques territoriales. Ces implications auront des conséquences sur les dynamiques territoriales, les paysages de ces territoires ainsi que sur leurs utilisations par leurs populations.

---

<sup>76</sup>Le traitement de futaie régulière est celui qui s'efforce de maintenir ou d'obtenir une structure régulière. C'est-à-dire quand tous les arbres ont sensiblement le même âge sur la surface d'une parcelle.

<sup>77</sup>Le traitement de futaie irrégulière s'efforce de maintenir ou d'obtenir une structure irrégulière, c'est-à-dire lorsque l'on rencontre sur toute la surface d'une parcelle un mélange d'arbres de toutes les classes d'âges.

<sup>78</sup>La substitution des espèces d'accroissement lente par des espèces d'accroissement rapide ne mène pas directement à un meilleur bénéfice en terme de carbone, cela dépend fortement de l'âge d'exploitabilité choisi pour chaque espèce, de l'usage du bois et de l'échelle de temps considérée. De façon générale, les espèces d'accroissement lentes ont des périodes de rotation plus longues, ce qui génère un stock de carbone moyen supérieur en forêt. Dans le même temps, elles génèrent moins de quantité de bois, ce qui aurait un impact sur les effets substitutions.

<sup>79</sup>Lors d'une fertilisation, les émissions provenant des engrais (notamment émissions de N<sub>2</sub>O des sols) et l'utilisation accrue de combustibles fossiles (pour produire et épandre ces engrais) devront cependant être incluses dans le calcul des incidences nettes de GES.

<sup>80</sup>Reboisement sur des zones déjà forestières afin d'augmenter la densité de la biomasse existante.

# Annexe 1 : Protocole de Kyoto et proposition législative de l'Union européenne

## a. Prise en compte de la forêt dans le protocole de Kyoto

La forêt est prise en compte de deux façons dans le protocole : article 3.3 et 3.4.

L'article 3.3 est relatif aux activités de boisements, déboisements et reboisements (pour les terres ayant subi une conversion depuis 1990). Le bilan de l'article 3.3 pour la France est source de carbone pour les années 2008 et 2009. La déforestation en Guyane (orpaillage, agriculture, urbanisation) est responsable de la moitié de ces déboisements.

L'article 3.4 est relatif à la gestion forestière, il représente un « puits » de carbone important, supérieur à 70 000 Gg CO<sub>2</sub>e en 2008 et 2009. Les règles de comptabilisation permettent à la France de valoriser le puits de gestion forestière deux manières : il donne droit à 3.2 millions d'unités d'absorption (UA) qui lui permettent compenser les émissions des autres secteurs. De plus, il permet à la France de compenser la totalité des émissions de carbone lié au déboisement (article 3.3) compensation toutefois limitée par un plafond de 33 millions de tCO<sub>2</sub>e.

## b. Décisions prises à Durban en vue de la période 2013 -2020

Les décisions prises à Durban en décembre 2011 sur le secteur UTCATF (Usage des Terres, Changement d'Affectation des Terres et Foresterie = LULUCF en anglais) pour la seconde période d'engagement du protocole du Kyoto (2013/2020) incluent **l'obligation de comptabilisation de la gestion forestière** basée sur **un niveau de référence calculé pour chaque pays**. Le niveau de référence pour la France est ainsi de - 67.410 Mt CO<sub>2</sub> eq./an (prospective des émissions nettes annuelles - puits du carbone en forêt et produits bois pour la période 2013/2020). Le plafond sur les crédits issus de la comptabilisation de la gestion forestière a été fixé à 3,5% des émissions nationales totales hors UTCATF de l'année de base 1990, soit ~20 millions de tonnes d'équivalent CO<sub>2</sub> pour la France. La figure 1 résume schématiquement les changements de comptabilisation de la gestion forestière

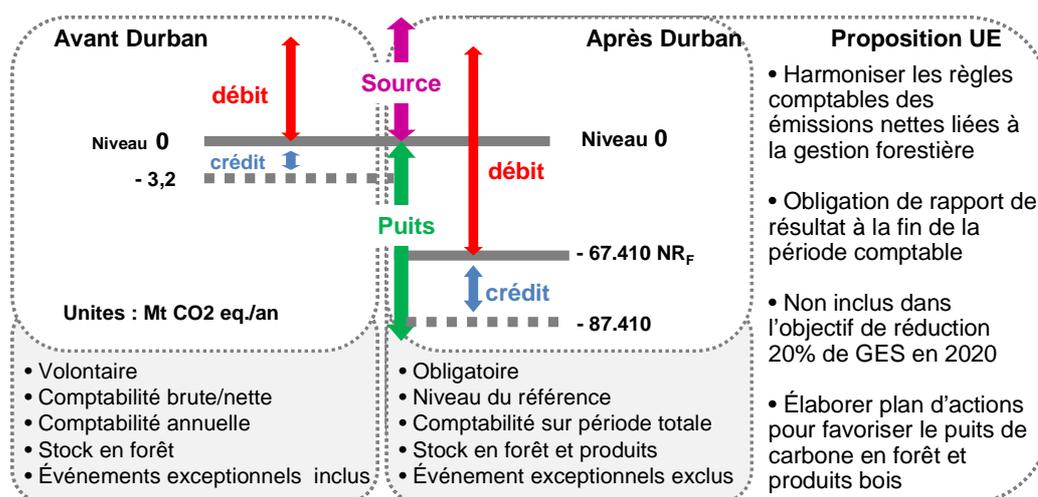


Figure 1. Protocole de Kyoto et proposition législative de l'Union européenne

Peu après Durban, la **Commission européenne a fait une proposition législative pour harmoniser entre les pays européens les règles comptables du calcul des émissions nettes liées à la gestion forestière**. D'autre part, cette proposition européenne marque **l'obligation de mettre en place un plan d'actions pour favoriser le puits de carbone en forêt et dans les produits bois** (construction, ameublement, hors bois énergie).

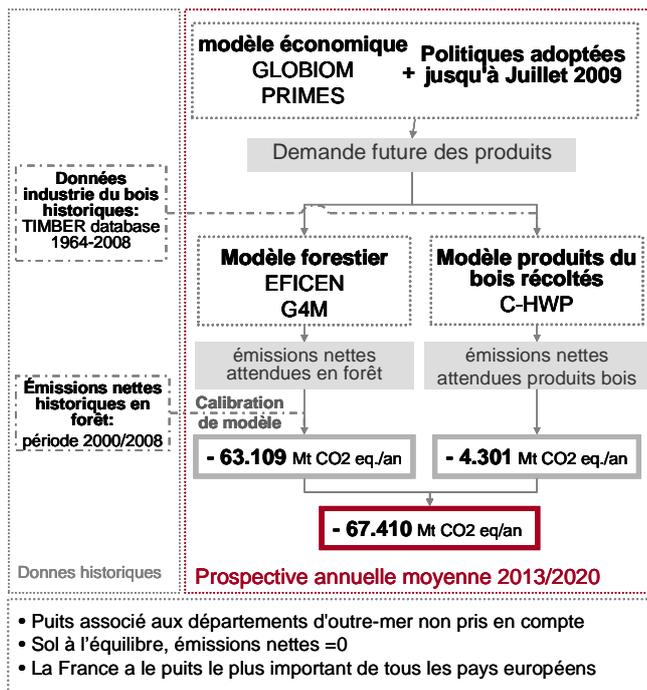


Figure 2. Méthodologie de construction du niveau de référence -

### c . Conclusion sur Kyoto et la prochaine période 2013- 2020

Dans la première période, les émissions liées à la combustion du carbone biogénique n'étaient pas été comptabilisées (neutralité carbone) et la prise en compte de la gestion de la forêt était volontaire et plafonnée de façon à éviter les effets d'aubaine liée à la croissance naturelle de la forêt.

La situation a désormais changé : la **récente obligation de comptabiliser la gestion de la forêt** (article 3.4) dans le protocole de Kyoto pour la période 2013-2020 **va donc inciter les Etats membres de l'Union Européenne à devoir prendre en compte le carbone biogénique**. Ainsi, d'ici 2013, **chaque état devra établir un plan d'action afin de maximiser le stockage de carbone en forêt**.

# Annexe 2 : Grille d'analyse des articles scientifiques

## INFORMATION GENERALE

- Auteurs
- Année
- Titre
- Pays et institution de recherche
- Revue et référence

## CONCLUSIONS

- Principales conclusions de l'auteur
- Fiabilité de l'étude (incertitude)
- Représentativité de résultats par rapport à les conditions de la forêt et filière bois française

## DESCRIPTION DE L'UNITE DE GESTION CONCERNEE(Dimension spatiale):

- Superficie de l'unité de gestion
- Localisation de l'unité de gestion
- Conditions du territoire : climat, conditions hydrologiques
- Type de forêt, type de gestion, type de sol, âge / structure-âge de peuplement, productivité

## DIMENSION TEMPORELLE :

- Temporalité (scénarios du temps)
- Risques et perturbations
- Evolution de conditionnes climatiques

## EVALUATION D'IMPACT SUR LE BILAN GES

- Description du modèle
- Comptabilité en stock, en flux or en stock et flux
- Indicateur spécifique de la mesure du impact :
- Facteurs pris en compte dans le bilan GES de la filière bois :

Facteur						Oui	No
<b>Variation de stock de carbone en forêt</b>							
Carbone pools pris en compte en forêt :							
biomasse aérienne	biomasse souterraine	litière	bois mort	sol organique	sol minéral		
<b>Emissions fossiles liées à la gestion de la forêt et à la chaîne de transformation</b>							
Gestion de la forêt	Transport	Production	Combustion				
<b>Stock en produit bois</b>							
<b>Substitution matériaux</b>							
<b>Substitution énergie</b>							

# Annexe 3 : Questionnaire

## Comment optimiser la contribution de la forêt française métropolitaine et ses filières bois matériau et bois énergie à l'atténuation du changement climatique ?

De façon générale, la forêt et la filière bois contribuent à l'atténuation du changement climatique de quatre façons différentes :

- e) Stockage de carbone dans les écosystèmes
- f) Stockage de carbone dans les produits bois
- g) Substituer du bois aux combustibles fossiles, bois énergie (substitution énergétique)
- h) Substituer du bois à des matériaux énergivores, bois matériaux (substitution matériaux)

Suite au Grenelle de l'environnement des objectifs ambitieux de production d'EnR à partir de la biomasse ont été fixés à l'horizon 2020. Les dernières estimations de l'ADEME donnent un besoin de prélèvement supplémentaire annuel d'environ +28 Mm<sup>3</sup>/an de bois énergie forestier.

Par ailleurs, la décision de Durban concernant l'intégration de l'UTCATF<sup>81</sup> dans les objectifs post Kyoto pose de nouvelles questions. Cette nouvelle règle incluent l'obligation de comptabilisation de la gestion forestière basée sur un niveau de référence calculé pour chaque pays. Par conséquent, cette règle vise à augmenter le processus de stockage de carbone par les forêts et les produits bois au-delà du scénario « business as usual ».

Dans ce contexte, nous souhaiterions connaître votre opinion sur les questions suivantes :

13. Dans quelles mesures les ressources forestières vous semblent-elles sous exploitées ?
14. Considérez-vous qu'une intensification de l'exploitation forestière puisse contribuer à atténuer le changement climatique ? Si non, pourquoi ? Si oui, comment ?
15. Quel équilibre trouver entre séquestration du carbone dans les écosystèmes et la substitution au profit des matériaux économes en énergie et les énergies renouvelables issues du bois ?
16. Selon vous, quel écosystème a le meilleur bilan GES au long de son cycle de vie : une forêt ancienne non exploitée ; une forêt exploitée de façon durable (ne pas couper plus que l'accroissement de la forêt et régénération ultérieure) ?
17. Considérez-vous que la filière bois énergie peut être considérée comme carbone neutre ?
18. Quel rôle peut jouer la collecte des rémanents<sup>82</sup> pour une utilisation énergétique dans la contribution à l'atténuation du changement climatique ? Quels sont les éléments favorables ? Quels sont les éléments défavorables ?
19. Selon vos critères, quelles sont les pratiques sylvicoles qui peuvent favoriser les puits de carbone en forêt ?
20. De quelle manière ces pratiques sont intégrées dans les documents de planification de la gestion forestière ? Ainsi que dans ceux des politiques publiques, par exemple dans les plans climat énergie territoriaux ? Selon vous, de quelle manière cette intégration pourrait-elle être améliorée ?
21. Selon vos critères, quelles sont les actions à mener sur les filières bois matériaux et bois énergie qui peuvent améliorer leur bilan GES ?

---

<sup>81</sup> Utilisation des Terres, Changement d'Affectation des Terres et Foresterie

<sup>82</sup> Sous entendu : menu bois et branches

22. De quelle manière ces actions sont intégrées dans les politiques publiques, par exemple dans les plans climat énergie territoriaux ? De quelle manière cette intégration pourrait-elle être améliorée ?
23. Quels sont les travaux et actions que votre organisation mène dans ce domaine ?
24. Selon vous, quels sont les besoins des travaux à mener pour la mise en place de stratégies forestières climat et énergie optimisées et cohérentes entre elles?

## Anexe 4 : Liste d'acteurs interviewés

### **Valentin Bellassen**

Chef de pôle recherche - Mécanismes de projet, agriculture, forêt  
Caisse des Dépôts et Consignation (CDC) Climat Recherche

### **Pascal BLANQUET**

Chargé de mission énergie climat  
Ministère de l'Ecologie, du Développement durable et de l'Energie (MEDDE)

### **Sylvain CAURLA**

Post Doctorant  
Laboratoire d'économie forestière de Nancy(LEF)

### **Loïc Casset**

Technicien forestier  
CRPF Rhône Alpes

### **Philippe Delacote**

Chargé de Recherches INRA  
Laboratoire d'économie forestière de Nancy(LEF)

### **Christine Deleuze**

Département recherche  
Office National des Forêts (ONF)

### **Gérard DEROUBAIX**

Responsable pôle qualité environnement  
Institut technologique Forêt bois cellulose ameublement (FCBA)

### **Jean-François DHOTE**

Chef du département recherche  
Office National des Forêts(ONF)

### **Sébastien Drouineau**

Economie - RQE  
CRPF Aquitaine

### **Mathieu Fortin**

Chercheur INRA  
Laboratoire d'Etude des Ressources Forêt-Bois (LERFoB)

### **Alain Givors**

Expert forestier  
Pro Silva France

### **Richard JOFFRE**

Directeur Adjoint  
Centre d'Ecologie Fonctionnelle et Evolutive (CEFE), UMR 5175 CNRS

### **Paul-Antoine LACOUR**

Directeur Energie/Environnement

Confédération Française de l'Industrie des Papiers, Cartons et Cellulose (COPACEL)

**Sebastiaan LUYSSAERT**

Chercheur CNRS

Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (LSCE)

**Nolwenn MARCHAND**

Responsable bois

Fédération Nationale des Communes Forestières (FNCOFOR)

**Julie MARSAUD**

Chargée de mission Coordinatrice du Réseau Forêt

France Nature Environnement (FNE)

**Inazio Martínez de Arano**

Chef de la direction et président de l'Institut européen de la forêt cultivée (IEFC).

Union des sylviculteurs du sud de l'Europe (USSE)

**Gert-Jan Nabuurs**

Assistant director

European Forest Institute (EFI)

**Jean-Luc PEYRON**

Directeur

GIP ECOFOR (groupement d'intérêt public recherche sur la forêt)

**Olivier PICARD**

Chef de service Recherche et Développement

Institut pour le Développement Forestier (IDF)/ Centre national de la Propriété Privée Forestière (CNPF)

**Marianne Rubio**

Program officer (expert forêt et carbone)

Office National des Forêts(ONF)

**Murielle TROUILLET**

Chargée de mission au Bureau de la stratégie environnementale et du changement climatique

Ministère de l'Alimentation, de l'Agriculture et de la Pêche (MAAP)

**Daniel VALLAURI**

Responsable Forêts France

World Wide Fund for Nature<sup>83</sup> (WWF)

**Marie Vallée**

Directrice

Forest Stewardship Council<sup>84</sup> (FSC) France

**Patrick Vallet**

Chercheur

Institut de recherche pour l'ingénierie de l'agriculture et de l'environnement(IRSTEA)

---

<sup>83</sup> Fonds mondial pour la nature, en français.

<sup>84</sup> Conseil de soutien de la forêt, en français.







## Résumé

Ce travail s'inscrit dans le débat scientifique actuel autour de l'optimisation de la contribution du secteur forestier à l'atténuation du changement climatique.

Une revue de la littérature scientifique nous a permis de constater l'existence d'incertitudes quant à la contribution à la réduction d'émissions à court et moyen terme d'une mobilisation accrue du bois en forêt métropolitaine pour la construction, l'habitat ou pour la génération d'énergie. L'horizon de temps à partir duquel les scénarios d'intensification du niveau de prélèvement commencent à générer des bénéfices en terme de réduction de gaz à effet de serre est très variable selon les caractéristiques de la filière en amont (type de forêt et du sol, âge de coupe, type de coupe, etc.) et en aval (distance du transport, usages du bois, l'efficacité du produit bois énergie, l'intensité GES du matériau remplacé par le bois ou de l'énergie fossile remplacée par le bois énergie, etc.).

Une enquête menée auprès des experts nationaux du secteur forestier nous a permis de constater que les pratiques sylvicoles optimales vis-à-vis du changement climatique font l'objet de débats et qu'elles peuvent être complètement opposées dans l'arbitrage entre la capitalisation du carbone dans les écosystèmes forestiers et la maximisation de la récolte afin de se substituer aux autres combustibles fossiles ou matériaux énergétiques.

Mots-clefs : forêt, carbone, bois-énergie, atténuation, changement climatique

## Abstract

This work contributes to the current scientific debate regarding the optimization of the forest sector's contribution to mitigating climate change.

A scientific literature review has pointed out some uncertainties on the contribution to emission reduction objectives in the short to medium-term of an increasing harvest of forest resources for wood construction and energy generation. Timing of mitigation benefits from additional fellings for a managed forest depends on forestry upstream characteristics (forest and soil type and silvicultural method) and downstream characteristics (transport distance, use of wood, efficiency of wood based energy production, fossil-fuel based reference system that is substituted, etc.).

A survey conducted among national forest experts points out debates concerning optimal silvicultural practices to mitigating climate change. These discussions are due to the trade-offs between sequestering carbon in forest ecosystems and climatic benefits obtained by sustainable forest harvesting and use of wood products to displace fossil emissions.

Keywords: forest, carbon, wood energy, mitigation, climate change