

RÉDUIRE LES ÉMISSIONS DE GAZ À EFFET DE SERRE ET PRODUIRE DU BOIS D'ŒUVRE DE CHÊNE SESSILE EN 100 ANS EN FUTAIE RÉGULIÈRE : DEUX OBJECTIFS CONCILIAIBLES ?

MATHIEU FORTIN – FRANÇOIS NINGRE

Depuis le sommet de Rio en 1992, le réchauffement climatique est au cœur des préoccupations des différentes sociétés (UNFCCC, 1997). La ratification du protocole de Kyoto en 1997 par la plupart des pays industrialisés n'est que la manifestation de cette préoccupation toujours croissante. Par cette ratification, les pays industrialisés se sont engagés à réduire leurs émissions de gaz à effet de serre (GES) à un niveau proche de celui de 1990.

Depuis plus d'une dizaine d'années, ces manifestations politiques ont attiré l'attention des scientifiques et des décideurs sur le potentiel de la forêt en matière de réduction des émissions de GES. Plusieurs études ont cherché à dresser le bilan carbone de peuplements-types soumis à différents itinéraires sylvicoles. Liski *et al.* (2001) ont étudié le bilan carbone des peuplements purs de Pin sylvestre (*Pinus sylvestris* L.) et d'Épicéa commun (*Picea abies* (L.) Karst.) pour des révolutions variant entre 60 et 120 ans. Perez-García *et al.* (2006) ont simulé l'évolution de forêts régulières aménagées avec des révolutions de 45, 80 et 120 ans dans le contexte américain. Plus près de nous, Vallet (2005) a comparé le bilan carbone de futaies régulières de Chêne sessile (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl.), de Hêtre (*Fagus sylvatica* L.), de Pin laricio (*Pinus nigra* J.F. Arnold) et de Douglas (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco).

En France, le Chêne sessile compte parmi les espèces les plus importantes à la fois par son abondance et son importance économique (IFN, 2008). Sa sylviculture a beaucoup évolué au cours du siècle dernier vers des itinéraires plus dynamiques, avec des densités de tiges plus faibles pour accélérer leur croissance en diamètre et des révolutions raccourcies. Aujourd'hui, il est même proposé en forêt privée (Lemaire, 2010) de produire du bois d'œuvre de Chêne sessile avec un âge d'exploitabilité de moins de 100 ans.

Face à l'ensemble des sylvicultures envisageables, il est légitime de s'interroger sur l'effet que pourrait avoir cet itinéraire très dynamique sur le bilan carbone du peuplement. Pour ce faire, nous utilisons une chaîne de modèles, élaborés dans notre laboratoire, afin de prédire l'évolution des stocks de carbone dans les compartiments de la forêt et des produits du bois ainsi que l'importance de l'effet de substitution d'énergie fossile par des produits du bois. Le bilan ainsi obtenu par cette chaîne de modèles est ensuite comparé à ceux d'autres études.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Itinéraire sylvicole

L'itinéraire sylvicole décrit par Lemaire (2010, p. 107) vise à produire des tiges de bois d'œuvre de Chêne sessile d'un diamètre égal ou supérieur à 60 cm en moins de 100 ans.

Il se décline en trois étapes définies par la hauteur dominante du peuplement :

- un dépressage intense entre 3 et 6 m de hauteur qui abaisse la densité entre 1 100 et 1 500 tiges par hectare ;
- entre 9 et 12 m de hauteur, la désignation de 70 tiges d'avenir à l'hectare suivie d'un ou de deux détourages vigoureux jusqu'à 16 m de hauteur ;
- au-delà de 16 m de hauteur, des éclaircies en plein, périodiques, prélevant 5 m²/ha en moyenne à chaque passage.

Notons que cet itinéraire est encore plus dynamique que ceux proposés en forêt publique par Jarret (2004) en chênaie atlantique ou par Sardin (2008) en chênaie continentale et que l'élagage artificiel des tiges d'avenir jusqu'à 6 m de hauteur y est obligatoire.

Bilan carbone

Le bilan carbone d'un itinéraire sylvicole est complexe à établir. En effet, il comprend deux compartiments de carbone, celui de la forêt et celui des produits du bois, en plus de certains flux de GES qui entrent et sortent de ces compartiments. La représentation de ce système implique une chaîne de modèles dynamiques afin de prévoir l'évolution des stocks de carbone dans les compartiments ainsi que l'importance des flux de GES.

Nous utilisons un système déjà défini dans Fortin *et al.* (2012). Il repose essentiellement sur un modèle de croissance qui permet de simuler la réponse des arbres et du peuplement à différents itinéraires sylvicoles. Un modèle de billonnage et un modèle de ligne de production permettent ensuite de prévoir la quantité et la nature des produits du bois qui seront générés au cours de la vie du peuplement. Le rythme auquel les produits du bois sont consommés est estimé à l'aide de modèles de durée de vie.

• *Modèle de croissance*

Le modèle de croissance mis à contribution pour l'estimation du bilan carbone de l'itinéraire dynamique est le simulateur *Fagacées*. Ce simulateur, mis au point au début des années 1990 pour les futaies pures et régulières (Dhôte, 1991 et 1996), se base sur la fertilité de la station et l'accroissement en hauteur dominante du peuplement pour faire croître chacune des tiges qui le composent. En plus des relations de base qui définissent la croissance, *Fagacées* comprend des relations allométriques qui permettent d'estimer la biomasse et le carbone des tiges individuelles (Nepveu, 1994 ; Guilley, 2000 ; Drexhage et Colin, 2001 ; Lamtom et Savidge, 2003 ; Vallet *et al.*, 2006).

• *Modèle de billonnage*

Le modèle de billonnage sert à prévoir les billons qui pourront être produits à partir d'un arbre récolté. Nous utiliserons le modèle de billonnage *GeoLog* (Bucket *et al.*, 2005 ; Mothe *et al.*, 2006). Ce modèle repose sur une équation de défilement des tiges. Pour le Chêne sessile, le modèle définit sept catégories de billon dont la qualité va de la plus haute à la plus basse : tranchage, merrain, ébénisterie, sciage industriel, LVL (*Laminated Veneer Lumber*), bois de trituration et bois énergie. Chaque catégorie possède ses exigences qui sont établies en fonction d'une partie ou de l'ensemble des variables suivantes : longueur de billon, diamètre du cœur branchu, diamètre du duramen et diamètre au fin bout.

• *Modèle de ligne de production*

Le modèle de ligne de production transforme les billons en produits finis. Pour définir un modèle de ligne de production plausible pour le Chêne sessile, nous avons combiné deux sources d'information : Deroubaix *et al.* (2003), une étude récente qui dresse le portrait de la filière bois

française toutes espèces confondues, et Normandin (1990), une étude plus ancienne, mais spécifique au Chêne. Ce modèle a pour objectif de reconstituer la filière bois française et d'estimer la nature et la quantité de produits du bois que peut générer une forêt gérée. Le modèle de ligne de production tient compte de la valorisation des résidus connexes de sciage.

• *Modèles de durée de vie*

Les produits ont une durée de vie moyenne qui dépend de leur nature. Par exemple, on reconnaît que les meubles ont des durées de vie plus longues que le papier ou le bois énergie en moyenne. Plusieurs fonctions existent pour modéliser la probabilité qu'un produit d'avoit atteint sa durée de vie. Parmi celles-ci, la fonction exponentielle négative est sans doute la plus connue :

$$Pr(\lambda > t) = e^{-t/k}$$

où $Pr(\lambda > t)$ est la probabilité qu'un produit ait une durée de vie λ plus grande que t , t est le temps écoulé en année depuis la création du produit et k est un paramètre à estimer. Le paramètre k correspond en fait à la durée de vie moyenne de ce produit. La probabilité $Pr(\lambda > t)$ peut aussi être perçue comme la proportion du produit toujours en usage. Dans le contexte français, les estimations des durées de vie des produits proviennent essentiellement de dires d'experts. Ces durées de vie sont présentées au tableau I.

TABLEAU I **Type de produits finis et leurs durées de vie moyenne**

Type de produit fini	Durée de vie moyenne ⁽¹⁾ (année)
• Produits de construction :	
Planchers et charpentes	40,0
Revêtements extérieurs	20,0
Menuiseries intérieures	15,0
Autres produits	10,0
• Ameublement :	
Meubles de bureau	10,0
Meubles de cuisine	25,0
Meubles de maison	20,0
Chaises et autres sièges	13,0
Lits	13,0
• Emballages :	
Palettes et emballages lourds	6,3
• Tonnellerie :	
Tonneaux de Chêne	4,0
• Pâtes et papiers :	
Pâte de procédé mécanique	2,8
Pâte de procédé chimique	2,8
• Bois énergie domestique	1,7
• Bois énergie commercial :	
Granule de bois	1,7

(1) Les durées de vie sont inspirées des travaux de Deroubaix *et al.* (2003) et Vallet (2005). Elles ne sont pas spécifiques au Chêne et reposent essentiellement sur des dires d'experts.

Une fois que les produits ont atteint la fin de leur vie utile, nous posons l'hypothèse que 10 % de ceux-ci sont envoyés en décharge et que les 90 % restants sont brûlés pour produire de l'énergie. Le bois envoyé à la décharge se décompose dans des conditions anaérobiques de sorte que seule une partie du bois est sujette à la décomposition. Cette proportion que l'on nomme « fraction de carbone décomposable » est très variable selon les conditions de site. Le GIEC (Pipatti *et al.*, 2006a) propose une valeur de 50 % alors que Barlaz (2006) et Ximenes *et al.* (2008) ont estimé des valeurs variant entre 30 et 40 %. Dans la présente étude, nous avons retenu la valeur de 40 %. Cette fraction de carbone décomposable a une durée de vie moyenne que l'on estime à 25 ans (Pipatti *et al.*, 2006b).

- *Estimation des stocks et des flux de carbone*

L'estimation des stocks de carbone dans les compartiments de la forêt et des produits du bois se calcule à partir des estimations des différents modèles que comprend notre système. À chaque intervalle de croissance, les arbres et les produits du bois peuvent être convertis en biomasse qui est elle-même convertie en carbone afin d'obtenir le stock. Le suivi de l'infradensité du bois dans les produits du bois est un exercice difficilement réalisable dans le présent contexte. Par souci de simplicité, nous avons appliqué aux produits du bois un facteur d'infradensité constant. Ce facteur s'inspire des travaux de Nepveu (1994) et Guilley (2000) et se chiffre à 550 kg/m³. Comme la teneur en carbone est également un facteur constant, la masse de carbone contenu dans les produits du bois est ici directement proportionnelle à leur volume.

En plus des stocks de carbone contenus dans la forêt et les produits du bois, nous avons tenu compte de quatre flux additionnels qui sont :

- les émissions de GES évitées en utilisant des produits du bois à la place de matériaux concurrents. C'est ce que l'on appelle l'effet de substitution ;
- les émissions de GES d'origine fossile lors des interventions sylvicoles, du transport et de la transformation des billons en produits du bois ;
- les émissions de méthane provenant de la décomposition en conditions anaérobiques des produits du bois enfouis en décharge ;
- l'accumulation de la biomasse non décomposable en décharge.

L'effet de substitution et les émissions de GES dues à la sylviculture, au transport et à la transformation s'obtiennent par le biais d'inventaires de cycle de vie (ICV). Les facteurs de substitution et les ICV sont spécifiques aux produits du bois. Ils ont été documentés par plusieurs auteurs et organismes de recherche (Schlamadinger *et al.*, 1997 ; Petersen et Solberg, 2005 ; Petersen Raymer, 2006 ; FCBA, 2009a et 2009b). Nous avons retenu les facteurs de substitution et les émissions de GES avancés dans ces études.

Les émissions de CH₄ provenant de la décomposition du bois en conditions anaérobiques en décharge sont également comptabilisées dans le bilan carbone. À chaque intervalle de temps, la chaîne de modèles renseigne sur la proportion de carbone qui s'est décomposée. Dans ces conditions anaérobiques, on estime que la moitié du carbone est émis sous forme de CH₄ (Pipatti *et al.*, 2006b). Dans le même contexte, l'accumulation de biomasse en décharge constitue la somme des fractions de carbone non décomposables des produits qui y sont envoyés. Nous supposons également que le site de décharge ne dispose d'aucune installation de traitement du méthane.

Lors de la comptabilisation des émissions, nous avons tenu compte du potentiel de réchauffement global du méthane (CH₄). En fait, le méthane reste moins longtemps dans l'atmosphère que le CO₂, mais a un forçage radiatif plus important. Par conséquent, il contribue davantage à l'effet de serre. Le GIEC (2007) estime que l'émission d'une tonne de CH₄ équivaut à l'émission de 25 tonnes de CO₂.

Pour effectuer toutes ces analyses, nous avons utilisé la plateforme CAPSIS (<http://capsis.cirad.fr/capsis/presentation>). Cette plateforme contient un outil d'évaluation du bilan carbone mis au point dans notre laboratoire. Elle comprend également les modèles *Fagacées* et *GeoLog*. Les modèles de ligne de production et de durée de vie sont pris en charge par l'outil d'évaluation. Dans notre étude, nous avons simulé l'évolution d'une futaie régulière de Chêne sessile dont la hauteur dominante est estimée à 27,5 m à 100 ans. Lors des interventions d'éclaircie et de la coupe finale, seule une fraction des houppiers est exportée hors du site à des fins de production de bois énergie. La fraction restante est considérée comme un débris de coupe au même titre que les systèmes racinaires et les souches des arbres récoltés. La décomposition de cette matière organique est prise en compte dans la simulation à l'aide d'un modèle de durée de vie au même titre que les différents produits du bois. Dans le cas présent, nous supposons une durée de vie moyenne de 10 ans.

RÉSULTATS

La simulation de l'itinéraire sylvicole à l'aide du modèle *Fagacées* donne une révolution de 99 ans (figure 1, ci-contre). Au total, le peuplement aura bénéficié de huit éclaircies avant la coupe finale et d'un programme d'élégage visant à favoriser la formation de bois d'œuvre. Les caractéristiques du peuplement avant intervention ainsi que les volumes récoltés sont présentés au tableau II (ci-dessous).

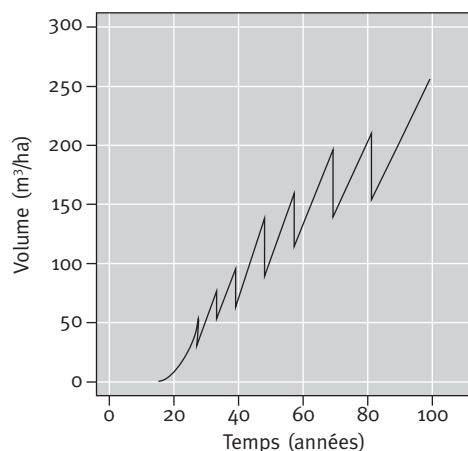


FIGURE 1
ÉVOLUTION DU VOLUME BOIS FORT
JUSQU'À LA COUPE FINALE
DANS UNE FUTAIE DE CHÊNE SESSILE
SOUMISE À UN ITINÉRAIRE TRÈS DYNAMIQUE.

Le volume utilisé correspond au volume de la tige et des branches jusqu'à une découpe minimale de 7 cm sur écorce

TABEAU II **Volumes récoltés et caractéristiques du peuplement avant les éclaircies**
et la coupe finale tels que simulés par *Fagacées*

Âge (années)	Avant intervention			Volume bois fort récolté ⁽¹⁾ (m³/ha)
	Densité de tiges (tiges/ha)	Surface terrière (m²/ha)	Volume bois fort ⁽¹⁾ (m³/ha)	
15	62 598	14,9	0,7	0,0
27	1 457	13,0	46,3	14,2
33	755	13,1	77,8	24,1
39	460	13,4	96,1	32,0
48	288	14,9	139,9	50,0
57	174	14,1	161,1	49,4
69	116	15,0	196,8	59,5
81	79	14,9	211,3	58,7
99	56	16,6	256,8	256,8

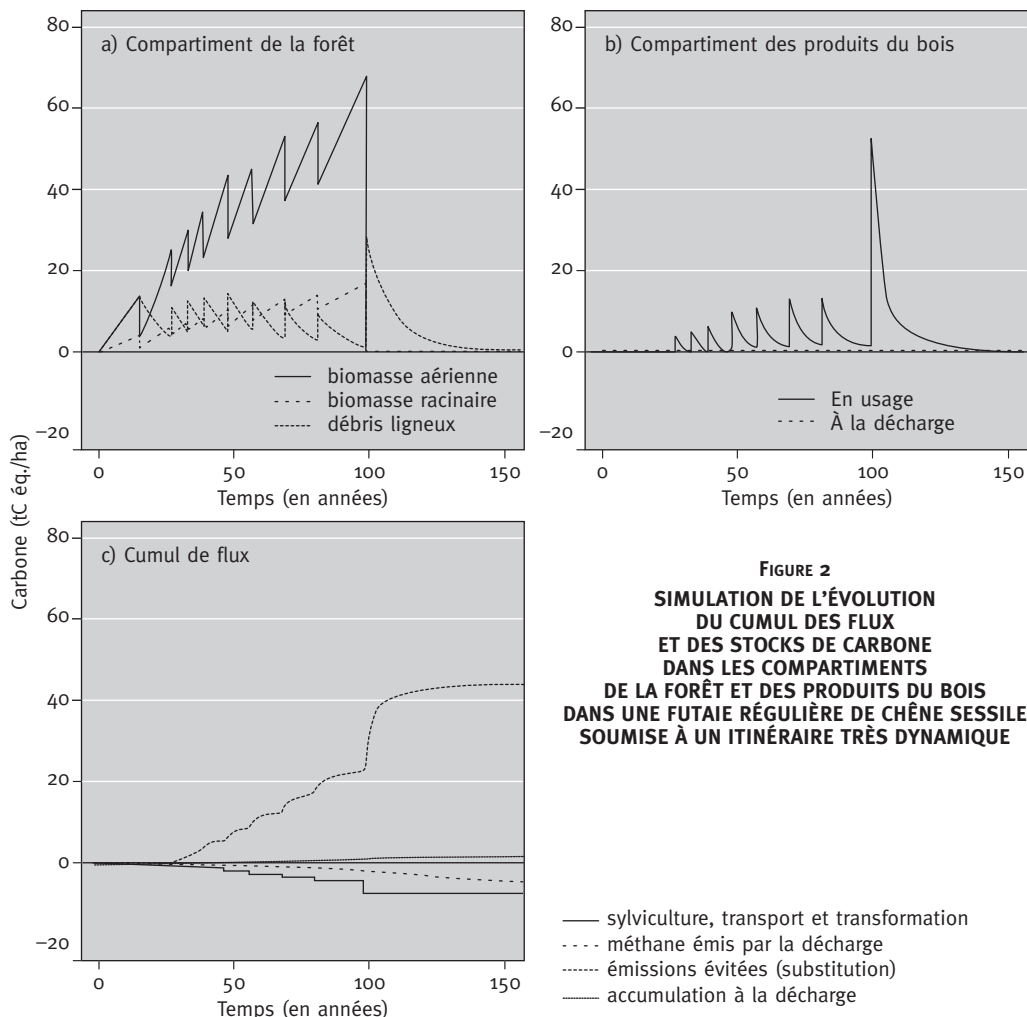
(1) Le volume indiqué correspond au volume de la tige et des branches jusqu'à une découpe minimale de 7 cm sur écorce.

Le volume bois fort (volume du tronc et des branches jusqu'à une découpe de 7 cm de diamètre sur écorce) issu des éclaircies est de 288 m³/ha, alors que le volume bois fort récolté lors de la coupe finale atteint 257 m³/ha. Sur l'ensemble de la révolution, le peuplement maintient une productivité moyenne de 5,5 m³/ha/an en volume bois fort.

En termes de volume et de masse de carbone, l'assortiment des produits du bois est le suivant :

- 4 % dans la construction ;
- 11 % dans l'ameublement ;
- 3 % dans les emballages ;
- 1 % dans la tonnellerie ;
- 7 % dans les pâtes et papiers ;
- 74 % dans le bois énergie domestique et commercial.

L'évolution des stocks dans les compartiments de la forêt et des produits du bois ainsi que l'évolution du cumul des flux sont présentées à la figure 2 (ci-dessous).



Au moment de la coupe finale, la biomasse aérienne compte près de 70 tC/ha alors que la biomasse racinaire atteint environ 20 tC/ha (figure 2a). Immédiatement après la coupe finale, les débris ligneux s'élèvent à 30 tC/ha. Ces débris comprennent à la fois les fractions de houppiers laissées sur le site après l'intervention, les souches et les systèmes racinaires des arbres récoltés.

Le stock de carbone dans le sous-compartiment des produits du bois en usage augmente fortement après les éclaircies et la coupe finale (figure 2b). Ce stock décroît rapidement, signe que la majorité des produits du bois ont une courte durée de vie. C'est immédiatement après la coupe finale que le stock atteint son plus haut niveau, soit près de 60 tC/ha. Quant au sous-compartiment des produits du bois en décharge, il ne compte que très peu de carbone.

Le flux cumulatif le plus important est celui de la substitution (figure 2c). Dans l'ensemble, l'utilisation de produits du bois permettrait d'éviter des émissions de GES équivalentes à 45 tC/ha. La sylviculture, le transport et la transformation des produits du bois génèrent moins de 10 tC éq./ha. Le méthane émis par la décomposition anaérobique du bois à la décharge compte pour moins de 10 tC éq./ha. Finalement, l'accumulation de biomasse à la décharge, soit la fraction non décomposable des produits du bois, représente moins de 5 tC éq./ha.

Le tableau III (ci-dessous) présente une estimation des stocks et des flux moyens sur l'ensemble de la révolution. En moyenne, le compartiment de la forêt conserve un stock de près de 50 tC/ha dont les deux tiers sont contenus dans la biomasse aérienne. Le compartiment des produits du bois affiche un stock moyen beaucoup plus modeste d'environ 6 tC/ha qui provient essentiellement des produits du bois en usage. En moyenne, les flux positifs atteignent près de 0,5 tC/ha/an et proviennent principalement de la substitution. Les flux négatifs dépassent légèrement le seuil de 0,1 tC/ha/an. Les émissions liées aux interventions sylvicoles, au transport et à la transformation des produits du bois représentent environ 60 % des flux négatifs alors que le méthane de la décharge compte pour les 40 % restants.

TABLEAU III **Estimation des stocks et des flux moyens de carbone dans des futaies régulières de Chêne sessile soumises à différents itinéraires**

Compartiments et flux	Stock moyen (tC/ha)			
	Itinéraire très dynamique ⁽¹⁾	Itinéraire dynamique ⁽²⁾	Itinéraire classique ⁽²⁾	Itinéraire peu dynamique ⁽²⁾
Forêt :				
• Biomasse aérienne	32,6	58,5	79,0	102,0
• Biomasse racinaire	8,1	13,1	17,1	21,3
• Débris ligneux	9,0	12,2	12,0	11,7
Produits du bois :				
• En usage	5,8	7,3	8,2	9,5
• En décharge	0,3	0,4	0,5	0,6
Flux	Flux moyen (tC/ha/an ou tC éq./ha/an)			
Sylviculture, transport et transformation . .	- 0,07	- 0,09	- 0,09	- 0,10
Méthane émis par la décharge	- 0,05	- 0,06	- 0,07	- 0,08
Émissions évitées	0,46	0,53	0,58	0,64
Accumulation à la décharge	0,02	0,03	0,03	0,03

(1) Tiré de la présente étude.

(2) Tirés de Fortin *et al.* (2012), les itinéraires dynamiques, classiques et peu dynamiques sont basés sur la même fertilité que celle de la présente étude et un diamètre final de 65 cm.

DISCUSSION

La simulation que nous avons effectuée permet de dresser le bilan carbone d'un itinéraire très dynamique dans une futaie régulière de Chêne sessile. Il en ressort que le compartiment de la forêt est celui qui contient le plus de carbone en moyenne. Lorsque l'on compare les compartiments de carbone de la forêt et des produits du bois, on constate que le stock moyen dans les produits du bois, qu'ils soient en usage ou en décharge, atteint à peine plus d'un dixième du stock moyen de la forêt (tableau III, p. 357).

Plusieurs études ont mis en lumière le caractère marginal du compartiment des produits du bois par rapport à celui de la forêt à l'échelle de la parcelle forestière. Sans être négligeable, le compartiment des produits du bois est toujours largement inférieur à celui de la forêt (Liski *et al.*, 2001 ; Bucket *et al.*, 2005 ; Vallet, 2005 ; Perez-Garcia *et al.*, 2006). Deux facteurs expliquent cet état de fait.

D'une part, la vitesse de décroissance des stocks de carbone dans les produits du bois dépend de leur durée de vie. Si ces durées de vie étaient très longues, la décroissance serait lente et on observerait une accumulation plus importante dans le compartiment des produits du bois. Or, la grande majorité des produits du bois ont des durées de vie moyennes inférieures à 5 ans. Ces courtes durées de vie apparaissent clairement à la figure 2b (p. 356). On y constate que les stocks de carbone diminuent très rapidement entre les éclaircies et après la coupe finale.

D'autre part, le carbone de la futaie sur pied tend à s'accroître du fait de la croissance des arbres et, par conséquent, les stocks de carbone en forêt augmentent jusqu'à la sénescence du peuplement. L'augmentation des stocks dans le compartiment des produits de bois n'est possible que par la récolte d'arbres. Ces deux évolutions distinctes sont visibles à la figure 2 (p. 356).

Les courtes durées de vie ne sont pas spécifiques à cet itinéraire. En effet, les produits à courte durée de vie occupent une proportion semblable pour des itinéraires classiques appliqués dans un contexte similaire (Fortin *et al.*, 2012). Cette situation s'explique principalement par l'efficacité de la filière à transformer les bois feuillus. Les billons de sciage sont ceux qui permettent d'obtenir des produits du bois utilisés dans la construction et l'ameublement, soit ceux qui ont les plus longues durées de vie. Dès la première transformation, la moitié du volume des bois devient des produits connexes habituellement destinés à la production d'énergie, de papier ou de panneaux. Même si l'efficacité de la deuxième transformation peut atteindre 70-80 %, il n'en demeure pas moins que seule une fraction de ce billon de sciage sort de la ligne de production sous forme de produits destinés à la construction et l'ameublement. Le restant ne génère que des produits à courte durée de vie. Vallet (2005, p. 74) estime la durée de vie apparente des billons destinés à la construction à moins de 10 ans. Cette durée de vie apparente est en fait la moyenne des durées de vie de chacun des produits issus de ce billon pondérée par leurs proportions. Il va sans dire que la capacité de la filière à générer des produits du bois à longue durée de vie est grandement limitée par le nombre de billons de qualité appropriée et la capacité à transformer efficacement ces billons.

La comparaison entre le bilan carbone de cette étude et ceux d'études semblables démontre que les itinéraires sylvicoles courts maintiennent en moyenne des stocks de carbone plus bas que ceux des itinéraires longs. Ainsi Vallet (2005, p. 101) a-t-il testé deux itinéraires basés sur une hauteur dominante de 25 m à 100 ans et un diamètre final de 70 cm. Les révolutions associées à ces deux itinéraires atteignaient des durées de 156 et 219 ans dans des futaies régulières de Chêne sessile. L'itinéraire le plus court correspondait à des stocks moyens de 59,2 tC/ha et 9,0 tC/ha dans les compartiments de la forêt et des produits du bois respectivement. L'itinéraire le plus long quant à lui permettait de maintenir des stocks moyens de 121,9 tC/ha et 12,4 tC/ha

dans les compartiments de la forêt et des produits du bois. Dans tous les cas, ces estimations sont plus élevées que celles de l'itinéraire dynamique étudié ici.

L'effet de substitution peut jouer un rôle primordial dans la lutte contre les émissions de GES. Dans cette étude, l'effet de substitution est estimé à près de 0,50 tC éq./ha/an (tableau III, p. 357). Cumulé sur l'ensemble de la révolution, cet effet de substitution permet d'éviter l'émission de plus de 40 tC éq./ha. Pour le Chêne sessile en futaie régulière, plus l'itinéraire est long, plus l'effet de substitution semble important. Fortin *et al.* (2012) ont comparé trois itinéraires basés sur une hauteur dominante de 27,5 m à 100 ans et un diamètre final de 65 cm dans des futaies de Chêne sessile. Les trois itinéraires ont donné des révolutions de 135, 156 et 177 ans et les substitutions estimées étaient de 0,53, 0,58 et 0,64 tC éq./ha/an (tableau III), des valeurs qui sont toutes plus élevées que celle de la présente étude.

Les émissions de méthane que nous obtenons dans nos simulations sont relativement faibles en raison de la faible proportion des bois qui terminent leur vie en décharge. Le bilan carbone de l'itinéraire pourrait être amélioré si le site de décharge disposait d'une installation de captation du méthane. Dans le contexte de notre étude, nous ne disposons pas d'estimations fiables sur la performance de ce processus industriel. Nous avons donc posé l'hypothèse que ces installations étaient absentes. Dans le cas des sites possédant de telles installations, le méthane ainsi capté peut servir à des fins énergétiques et contribuer à l'effet de substitution. En ce qui concerne notre étude, nous croyons que l'amélioration du bilan serait faible étant donné la faible quantité de méthane émise.

La quasi-constance de l'assortiment de produits peut être réelle ou en partie causée par notre méthodologie et les hypothèses que nous avons acceptées. En effet, le modèle de billonnage *GeoLog* repose sur le diamètre et le défilement des tiges ainsi que sur le diamètre du cœur branchu et du duramen. Rappelons aussi que nous avons considéré que les tiges du peuplement final avaient toutes bénéficié d'un élagage artificiel. Il est toutefois difficile de tenir compte de l'impact de cet élagage artificiel sur la qualité des billons. Cette limite reste à confirmer et, éventuellement, à corriger lors de travaux futurs.

Par ailleurs, le modèle *Fagacées* a été ajusté à l'aide de placettes-échantillons permanentes soumises à des itinéraires moins dynamiques que celui de notre étude. Nous pouvons donc penser avec raison que certains effets de l'itinéraire ne sont pas considérés dans la simulation. L'apparition d'un sous-étage avec des densités de tiges aussi faible est très probable. De plus, il est possible que les faibles densités de tiges et l'élagage artificiel aient un effet sur le défilement des arbres. À notre connaissance, aucun modèle n'existe qui nous aurait permis de simuler l'évolution de ce peuplement en tenant compte de ces éléments. Le modèle *Fagacées*, même s'il est la meilleure option pour le moment, est bien une des limites de notre étude.

CONSÉQUENCES POUR L'AMÉNAGEMENT

Cette étude dresse le portrait du bilan carbone d'une futaie régulière de Chêne sessile soumise à un itinéraire très dynamique aujourd'hui préconisé en forêt privée. Il est pertinent de rappeler que cet itinéraire requiert un élagage artificiel des tiges du peuplement principal. Notre étude démontre que des futaies soumises à cet itinéraire stockeront moins de carbone en moyenne que celles qui suivent des itinéraires dont les révolutions sont plus longues en raison d'une sylviculture moins dynamique ou d'un diamètre final plus élevé.

Le carbone n'est qu'un enjeu parmi d'autres. En forêt privée, les impératifs financiers plaident en faveur d'itinéraires plus courts. Par ailleurs, les risques de dommages causés par les tempêtes

sont susceptibles d'affecter les itinéraires plus longs et ne sont pas pris en compte dans cette étude, pas davantage d'ailleurs que dans celle de Fortin *et al.* (2012). La prévention de ces dommages peut être un autre argument en faveur d'un itinéraire plus dynamique.

Le bilan carbone que nous avons dressé dans cette étude s'applique à l'échelle d'une parcelle forestière. Notre objectif était de renseigner les forestiers sur l'impact d'un itinéraire très dynamique en termes de carbone. Bien que cet itinéraire ait un impact négatif sur le bilan carbone considéré très localement, la perspective à une échelle régionale, voire nationale, pourrait être toute autre. En effet, si les impératifs régionaux étaient de remplacer à courte échéance les énergies fossiles par des énergies vertes, l'itinéraire dynamique pourrait s'avérer adéquat afin de produire rapidement la biomasse nécessaire, malgré un déstockage de carbone en forêt. À titre d'exemple, nous pourrions imaginer un massif forestier largement dominé par des parcelles dont les peuplements sont très jeunes. L'itinéraire proposé ici permettrait de produire plus de bois à court et moyen termes qu'un itinéraire classique pour lequel nous devrions attendre 150 ans ou même davantage avant d'effectuer la coupe finale. En ce sens, l'itinéraire très dynamique pourrait sans doute produire plus de bois énergie à court et moyen termes et, par ce fait même, contribuer davantage à la réduction des émissions de carbone. Cet impact à l'échelle régionale reste à étudier.

Mathieu FORTIN

Laboratoire d'Étude des Ressources Forêt-Bois
(UMR 1092)
AgroParisTech
14 rue Girardet – CS 14216
F-54042 NANCY Cédex
(mathieu.fortin@agroparistech.fr)

François NINGRE

Laboratoire d'Étude des Ressources Forêt-Bois
(UMR 1092)
INRA Centre de Nancy
F-54280 CHAMPENOUX
(ningre@nancy.inra.fr)

Remerciements

Le premier auteur a occupé un poste d'interface à l'INRA. Ce poste a été créé à l'initiative du groupe France-Forêt (ONF, IDF, CRPF). Les auteurs tiennent à remercier les membres du comité de pilotage de ce poste et, plus particulièrement, Jean-François Dhôte (ONF), Olivier Picard (IDF), Estelle Vial (FCBA) pour leurs commentaires. Merci également à Jean Lemaire et Simon Martel (IDF) pour leurs contributions intellectuelles. Merci enfin pour leurs suggestions de correction aux deux lecteurs arbitres qui avaient été choisis par la *Revue forestière française*.

BIBLIOGRAPHIE

- BARLAZ (M.A.). — Forest products decomposition in municipal solid waste landfills. — *Waste Management*, 26, 2006, pp. 469-477.
- BUCKET (E.), LE MOGUEDEC (G.), MOTHE (F.), NEPVEU (G.). — Une modélisation des bilans « environnement » et « produits » de sylvicultures contrastées : cas du Chêne sessile. — *Revue forestière française*, vol. LVII, n° 3, 2005, pp. 311-330.

- DEROUBAIX (G.), PAQUE (M.), MALSOT (J.), LOCHU (S.), PEYRON (M.), PRIEUR (A.), RAJI (M.). — Extension de l'éligibilité de la séquestration forestière du carbone à l'ensemble de la filière bois. Rapport final. — Paris : CTBA, 2003. — 148 p.
- DHÔTE (J.-F.). — Modélisation de la croissance des peuplements réguliers de Hêtre : dynamique des hiérarchies sociales et facteurs de production. — *Annals of Forest Science*, vol. 62, 1991, pp. 903-909.
- DHÔTE (J.-F.). — A model for even-aged beech stands productivity with process-based interpretations. — *Annals of Forest Science*, 53, 1996, pp. 1-20.
- DREXHAGE (M.), COLIN (F.). — Estimating root system biomass from breast-height diameters. — *Forestry*, 74, 2001, pp. 491-497.
- FCBA. — Déclaration environnementale et sanitaire conforme à la norme NF P 01-010. Charpente bois traditionnelle (Chêne et résineux). — Paris : FCBA Institut technologique, 2009a. — 23 p.
- FCBA. — Déclaration environnementale et sanitaire conforme à la norme NF P 01-010. Panneau MDF (*Medium Density Fiber*) Standard Mélaminé ou Panneau de fibres mélaminé standard obtenues par voie sèche pour l'utilisation en milieu humide épaisseurs 12, 18, 19, 20, 22, 25. — Paris : FCBA Institut technologique, 2009b. — 34 p.
- FORTIN (M.), NINGRE (F.), ROBERT (N.), MOTHE (F.). — Quantifying the impact of forest management on the carbon balance of the forest-wood product chain: A case study applied to even-aged oak stands in France. — *Forest Ecology and Management*, 279, 2012, pp. 176-188.
- GIEC. — Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the International Panel on Climate Change / S. Solomon, D. Gin *et al.*, editors. — New York : Cambridge University Press, 2007. — 996 p.
- GUILLEY (E.). — La Densité du bois de Chêne sessile (*Quercus petraea* Liebl.) : Élaboration d'un modèle pour l'analyse des variabilités intra- et inter-arbre ; Origine et évaluation non destructive de l'effet « arbre » ; Interprétation anatomique du modèle proposé. — Nancy : École nationale du Génie rural, des Eaux et des Forêts (ENGREF), 2000. — 206 p. (Thèse de doctorat).
- IFN. — Rapport d'activité 2008. — Inventaire forestier national, 2008. — 60 p.
- JARRET (P.). — Chênaies atlantiques. Guide des sylvicultures. — Paris : Office national des forêts, 2004. — 335 p.
- LAMLOM (S.H.), SAVIDGE (R.A.). — A reassessment of carbon content in wood: variation within and between 41 North American species. — *Biomass and Bioenergy*, 25, 2003, pp. 381-388.
- LEMAIRE (J.). — Le Chêne autrement. Produire du chêne de qualité en moins de 100 ans en futaie régulière. — Paris : Forêt Privée Française CNPF/IDF, 2010. — 176 p.
- LISKI (J.), PUSSINEN (A.), PINGOUD (K.), MÄKIPÄÄ (R.), KARJALAINEN (T.). — Which rotation length is favourable to carbon sequestration? — *Canadian Journal of Forest Research*, 31, 2001, pp. 2004-2013.
- MOTHE (F.), LE MOGUEDEC (G.), NEPVEU (G.), BUCKET (E.). — A logging module for oak connected to the *Fagacées* model. Oral presentation at CAPSIS 6th annual meeting on June 28th, 2006. [En ligne] URL : http://capsis.cirad.fr/capsis/_media/documentation/slides/28june2006/fm_Fred_Capsis2006.pdf.
- NEPVEU (G.). — Variabilité. *Dans* : Le bois matériau d'ingénierie / P. Jodin, éditeur. — Nancy : Association pour la recherche sur le bois en Lorraine (ARBOLOR), 1994. — pp. 128-182.
- NORMANDIN (D.). — Le Chêne français et ses produits dérivés. Marché intérieur et concurrence internationale. — *Revue forestière française*, vol. XLII, n° 2, 1990, pp. 110-118.
- PEREZ-GARCIA (J.), LIPPKE (B.), COMNICK (J.), MANRIQUEZ (C.). — An assessment of carbon pools, storage, and wood products market substitution using life-cycle analysis results. — *Wood and Fiber Science*, 37, 2006, pp. 140-148.
- PETERSEN (A.K.), SOLBERG (B.). — Environmental and economic impacts of substitution between wood products and alternative materials: a review of micro-level analyses from Norway to Sweden. — *Forest Policy and Economics*, 7, 2005, pp. 249-259.
- PETERSEN RAYMER (A.K.). — A comparison of avoided greenhouse gas emissions when using different kinds of wood energy. — *Biomass and Bioenergy*, 30, 2006, pp. 605-617.
- PIPATTI (R.), SHARMA (C.), YAMADA (M.), SILVA ALVES (J.W.), GAO (Q.), SABIN GUENDEHOU (G.H.), KOCH (M.), LÓPEZ CABRERA (C.), MARECKOVA (K.), OONK (H.), SCHEEHLE (E.), SMITH (A.), SVARDAL (P.), MANSO VIEIRA (S.M.). — Waste generation, composition and management data. *In*: IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 5 /S. Waste Eggleston, L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara, K. Tanabe (editors). — Japan : IGES, 2006a. — Chapter 2, 23 p.

- PIPATTI (R.), SVARDAL (P.), SILVA ALVES (J.W.), GAO (Q.), LÓPEZ CABRERA (C.), MARECKOVA (K.), OONK (H.), SCHEEHLE (E.), SHARMA (C.), SMITH (A.), YAMADA (M.). — Solid waste disposal. *In*: IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 5 /S. Waste Eggleston, L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara, K. Tanabe (editors). — Japan : IGES, 2006b. — Chapter 3, 40 p.
- SARDIN (T.). — Chênaies continentales. Guide des sylvicultures. — Paris: Office national des forêts, 2008. — 455 p.
- SCHLAMADINGER (B.), APPS (M.), BOHLIN (F.), GUSTAVSSON (L.), JUNGMEIER (G.), MARLAND (G.), PINGOUD (K.), SAVOLAINEN (I.). — Towards a standard methodology for greenhouse gas balances of bioenergy systems in comparison with fossil energy systems. — *Biomass and Bioenergy*, 13, 1997, pp. 359-375.
- UNFCCC. — Kyoto protocol. — United Nations Framework Convention on Climate Change. — UNFCCC, 1997. — [En ligne] URL : <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpfrench.pdf>.
- VALLET (P.). — Impact de différentes stratégies sylvicoles sur la fonction « puits de carbone » des peuplements forestiers. Modélisation et simulation à l'échelle de la parcelle. — Nancy : École nationale du Génie rural, des Eaux et des Forêts (ENGREF), 2005. — 195 p. (Thèse de doctorat).
- VALLET (P.), DHÔTE (J.-F.), LE MOGUEDEC (G.), RAVART (M.), PIGNARD (G.). — Development of total above-ground volume equations for seven important forest tree species in France. — *Forest Ecology and Management*, 229, 2006, pp. 98-110.
- XIMENES (F.A.), GARDNER (W.D.), COWIE (A.L.). — The decomposition of wood products in landfills in Sydney, Australia. — *Waste Management*, 28, 2008, pp. 2344-2354.

RÉDUIRE LES ÉMISSIONS DE GAZ À EFFET DE SERRE ET PRODUIRE DU BOIS D'ŒUVRE DE CHÊNE SESSILE EN 100 ANS EN FUTAIE RÉGULIÈRE : DEUX OBJECTIFS CONCILIAIBLES ? [Résumé]

Depuis plus d'une décennie, la réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES) est au cœur des préoccupations des sociétés. Les scientifiques ont cherché à démontrer le potentiel des forêts en matière de réduction des émissions de GES. Comme la sylviculture affecte la croissance des forêts, on peut s'interroger quant à l'effet des différents itinéraires sylvicoles sur le bilan carbone des peuplements. Dans cette étude, nous dressons le bilan carbone d'une futaie de Chêne sessile suivant un itinéraire très dynamique tel que proposé en forêt privée. Cet itinéraire défini par Lemaire (2010) vise à produire du bois d'œuvre de Chêne sessile en moins de 100 ans. Nous utilisons une chaîne de modèles de croissance et de qualité élaborés dans notre laboratoire pour estimer les stocks de carbone en forêt et dans les produits du bois. La comparaison entre les résultats de cette étude et ceux d'études semblables démontre que l'itinéraire très dynamique maintient des stocks de carbone de 50 tC/ha en moyenne. Cette valeur est toutefois plus faible que celles issues d'un itinéraire classique (Fortin *et al.*, 2012). La substitution d'énergie fossile par des produits du bois (0,5 tC/ha/an) est également plus faible en moyenne. En somme, l'itinéraire génère plus rapidement du bois d'œuvre de Chêne sessile, mais il le fait au détriment du bilan carbone. Toutefois, l'effet des tempêtes sur ce bilan carbone reste à quantifier et pourrait éventuellement moduler cette conclusion.

REDUCING GREENHOUSE GAS EMISSIONS WHILE PRODUCING TIMBER FROM EVEN-AGED SESSILE OAK STANDS WITHIN 100 YEARS - A REALISTIC GOAL? [Abstract]

For over a decade, reducing emissions of greenhouse gases (GHG) has been a core preoccupation for our societies. Scientists have sought to demonstrate the potential of forests for reducing GHG emissions. Silvicultural practices affect the growth of forests, raising the question of the impact of different silvicultural schemes on the carbon balance of forest stands. In this study, we assess the carbon balance of a sessile oak stand that follows a very dynamic scheme proposed for private forests. The aim of this scheme defined by Lemaire (2010) is to produce timber from sessile oak within 100 years. We use a chain of growth and quality models developed in our laboratory to estimate carbon stocks in forests and in wood products. A comparison between the results of this study and similar studies shows that the dynamic scheme maintains carbon stocks at 50 tC/ha on average. This value is however lower than those derived from a conventional scheme (Fortin *et al.*, 2012). Substitution of fossil energy by wood products (0.5 tC/ha/year) is also lower on average. In short, the dynamic scheme produces sessile oak timber more quickly, but it does so at the expense of the carbon balance. However, the effect of storms on the carbon footprint has yet to be quantified and could alter this conclusion.