FORÊT
•NATURE

OUTILS POUR UNE GESTION
RÉSILIENTE DES ESPACES NATURELS

Tiré à part de la revue
Forêt.Nature

La reproduction ou la mise en ligne totale ou partielle des textes
et des illustrations est soumise à l'autorisation de la rédaction

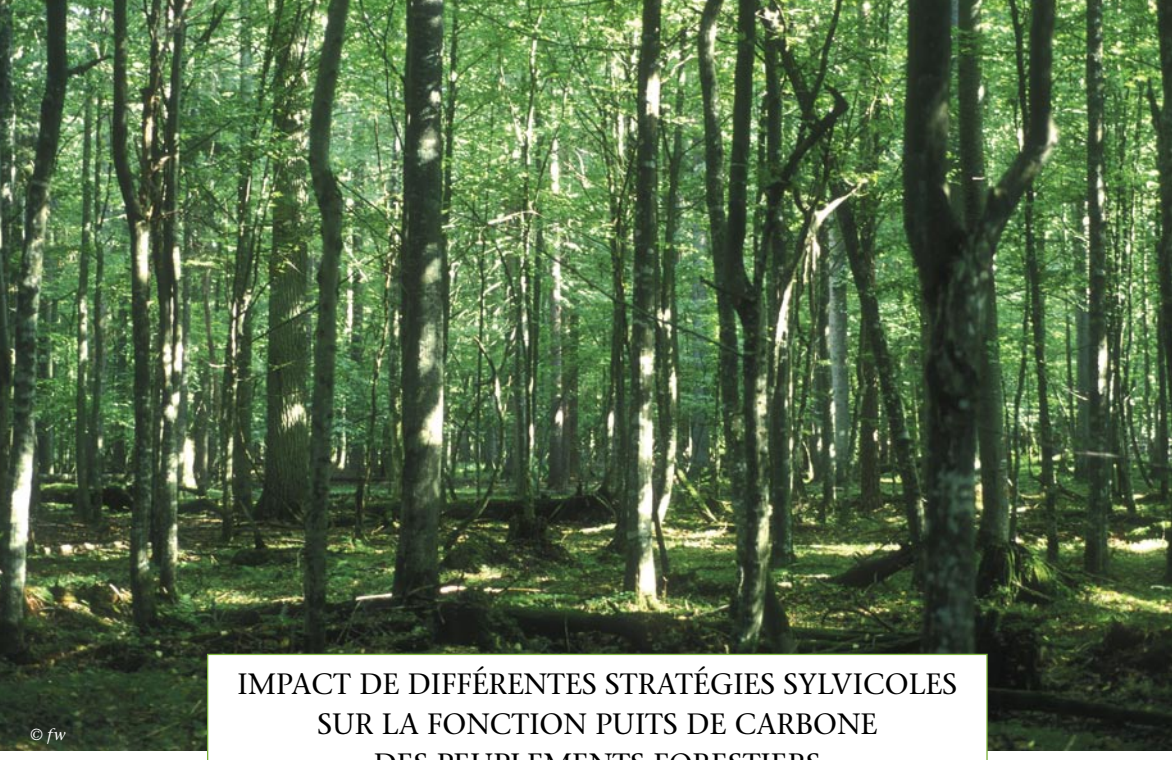
foretnature.be

Rédaction : Rue de la Plaine 9, B-6900 Marche. info@foretnature.be. T +32 (0)84 22 35 70

Abonnement à la revue Forêt.Nature :
librairie.foretnature.be

Abonnez-vous gratuitement à Forêt.Mail et Forest.News :
foretnature.be

Retrouvez les anciens articles de la revue
et d'autres ressources : **foretnature.be**



© *fw*

IMPACT DE DIFFÉRENTES STRATÉGIES SYLVICOLES SUR LA FONCTION PUITS DE CARBONE DES PEUPLEMENTS FORESTIERS

PATRICK VALLET

La capitalisation sur pied et la substitution d'essences sont deux stratégies sylvicoles pressenties pour être favorables au stockage du carbone, enjeu majeur de ce XXI^e^ siècle pour la lutte contre le réchauffement climatique.

La prise en compte des bilans de carbone liés à la forêt dans le protocole de Kyoto représente un enjeu certain pour une série de pays. La nécessité de pouvoir comptabiliser les gains ou les pertes en matière de carbone lié à la forêt est indispensable à la mise en place des accords internationaux dans le marché des quotas de carbone.

CONTEXTE GÉNÉRAL

De nombreuses études présentent déjà la problématique des gaz à effet de serre, ainsi que les bilans de carbone à l'échelle globale[2-11-14-21-22]. Néanmoins, pour permettre au lecteur d'appréhender le mieux possible la problématique actuelle, nous en proposons une présentation sommaire.

La figure 1, extraite d'une revue de CANNELL[2] reproduit le cycle du carbone à l'échelle planétaire et illustre l'existence de trois grands compartiments du carbone : l'atmosphère (750 GtC), la biomasse et les sols (2 050 GtC) et les océans (environ 40 000 GtC). Les hydrocarbures fossiles constituent un compartiment supplémentaire dont la taille n'est pas

réellement connue et qui, avant la révolution industrielle, était disjoint des trois réservoirs précédents.

La combustion des hydrocarbures fossiles ainsi que les cimenteries alimentent l'ensemble des trois grands compartiments dans lesquels se répartit le carbone émis. Si les océans absorbent une partie de ces émissions, la déforestation déstocke du carbone. Ainsi, le réservoir atmosphérique subit une augmentation de 3,4 GtC/an.

Il s'ensuit une très rapide augmentation de la concentration de CO_2 dans ce compartiment. De son niveau de 270 ppm à l'ère préindustrielle[2], le taux de CO_2 atmosphérique a augmenté de façon accélérée pour atteindre un niveau de 377 ppm en moyenne sur l'année 2004[13]. Des scénarios d'évolution future, en fonction des politiques possibles qui seront menées, ont été établis par l'IPCC*[12]. Les plus grandes incertitudes ne sont pas sur les aspects scientifiques des évolutions mais sur les décisions politiques qui seront prises. Les scénarios les plus optimistes impliquent un taux de gaz carbonique au-delà de 500 ppm en 2100.

Les conséquences de ce forçage radiatif sont exposées tous les jours dans les médias et nous ne les développerons pas ici. Notons seulement un point de repère : l'augmentation moyenne des températures à la surface du globe serait d'un peu plus de 1 °C en 2100 avec l'hypothèse la plus optimiste et de près de 6 °C avec la plus pessimiste[12]. À titre de comparaison, la température moyenne lors de la dernière glaciation était inférieure seulement de 4 à 5 °C par rapport à la température actuelle[2], ce qui permet de situer l'importance du problème et la nécessité d'y faire face.

Une des manières de faire face et d'atténuer l'effet de nos émissions de CO_2 serait de mettre en œuvre un stockage actif du carbone.

Les écosystèmes forestiers, grâce à la photosynthèse qui permet de fixer le CO_2 atmosphérique, peuvent participer au stockage de ce carbone de plusieurs manières[15] : par l'augmentation des surfaces forestières, par l'accroissement des stocks de carbone dans les forêts existantes ou encore par la substitution des combustibles fossiles par l'énergie biomasse.

CANNELL[3] a fait une estimation des potentialités de stockage de carbone à l'échelle de la planète : la biomasse pourrait de manière réaliste absorber 50 à 100 GtC pendant 50 ans, soit 1 à 2 GtC/an pendant cette période.

Dans la perspective où la gestion sylvicole donnerait lieu à des crédits d'émission à partir de la seconde période d'engagement, le Protocole de Kyoto stipule « la nécessité de communiquer des données transparentes et vérifiables »[24]. En conséquence, il serait nécessaire : 1. d'améliorer les procédures de comptabilité du carbone[25] ; 2. de mieux connaître, à la fois dans leurs principes mais aussi de manière concrète et quantifiée, les effets des choix de gestion sur les stocks de carbone forestiers et leurs variations ; 3. de décliner ces résultats dans un contexte où les facteurs de productions (climat, CO_2, qualités des sols, apports atmosphériques d'azote) et le contexte socio-économique vont évoluer rapidement ; 4. d'évaluer

* IPCC : Intergovernmental Panel on Climate Change (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat).

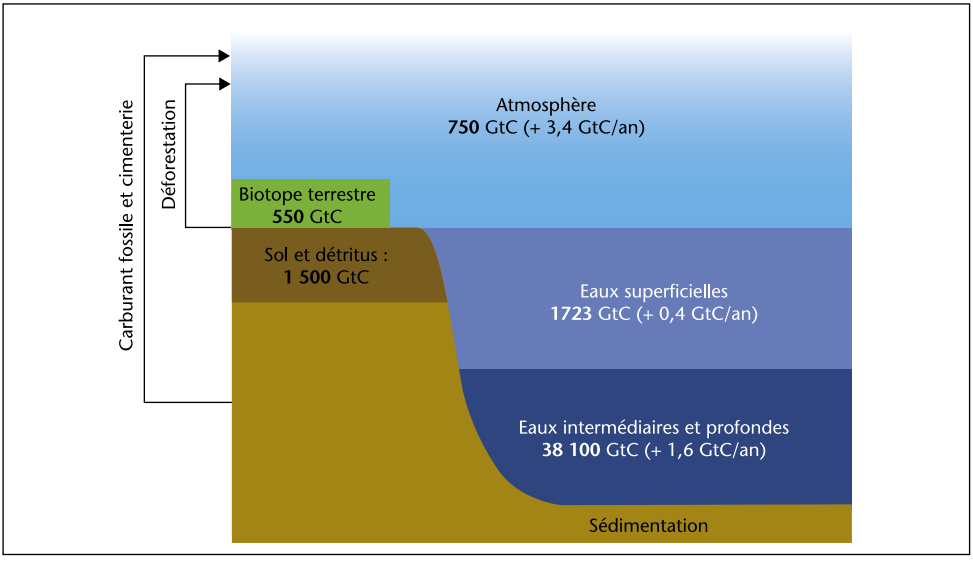


Figure 1 – Réservoirs de carbone entre 1980 et 1989 à l'échelle de la planète (adapté de CANNELL[2]).

sous l'angle de variations de stocks de carbone les différentes stratégies sylvicoles, à la fois à l'échelle du décideur de terrain et à l'échelle politique (impacts conjoints sur la biodiversité, les autres aspects environnementaux, les ressources en bois, la vulnérabilité des forêts).

Dans cet article, nous allons voir comment nous nous sommes appuyés sur les acquis pour modéliser quantitativement la réponse des stocks de carbone forestiers à des scénarios de gestion, en intégrant l'ensemble des compartiments et leurs dynamiques associées d'évolution du carbone.

Nous avons abordé deux stratégies sylvicoles :

1. Les volumes à l'hectare des forêts françaises sont en forte augmentation depuis au moins deux ou trois décennies[19]. Ce ralentissement des taux de coupe pourrait générer un stockage de carbone additionnel. Cette pratique est appelée « capitalisation sur pied ». L'impact de cette stratégie sylvicole est étudié pour deux grands feuillus en France, le chêne sessile et le hêtre.
2. Lorsqu'un peuplement forestier arrive en fin de révolution, la question de l'essence utilisée pour la révolution suivante se pose. En effet, les essences à croissance rapide ont des accroissements annuels en volume par définition très élevés, et l'on peut s'attendre alors à ce qu'elles soient plus favorables en termes de stockage de carbone que les essences à croissance lente. Cette seconde stratégie sylvicole étudiée est appelée « substitution d'essence ». Les substitutions abordées dans cet article sont celles des peuplements de chêne sessile par des plantations de pin laricio dans les régions Centre et Pays de la Loire, ainsi que celles des peuplements de hêtre par des plantations de douglas dans le Massif Central.

La première stratégie est présentée dans les lignes qui suivent. Pour la seconde, plus complexe, nous livrerons succinctement les conclusions auxquelles nous avons abouti. Pour plus de détails sur la méthodologie, le manuscrit de thèse est disponible en ligne (pastel.paristech.org/1635).

CONTEXTE PARTICULIER ET BORNES

Ci-dessous sont présentées quelques hypothèses et limitations qui bornent nos résultats.

Échelles spatiales

L'approche choisie est locale : l'étude porte sur des peuplements d'un hectare pour lesquels nous avons envisagé et comparé de nombreux itinéraires sylvicoles. Cette échelle correspond au niveau de décision de l'aménagiste forestier qui détermine la gestion sylvicole (âges d'exploitabilité, taux de coupes, choix des essences).

Ce type d'étude, sur cette échelle, permet par la suite d'agréger les résultats à des échelles plus vastes, comme celle du massif forestier dont l'état initial serait connu, pour estimer l'impact de ces stratégies sur les stocks de carbone et sur les implications vis-à-vis des objectifs de réduction des gaz à effet de serre.

Échelles temporelles

Nous ne nous sommes pas intéressés aux flux instantanés de carbone dans le peuplement mais plutôt aux variations de stocks engendrées par des modifications de pratiques sylvicoles. Ces pratiques ne sont détectables qu'à des échelles de temps suffisamment longues. L'échelle de temps pertinente pour estimer les variations de stocks de carbone est l'année, voire la décennie.

Compartiments concernés

La sylviculture influe fortement sur la croissance des peuplements forestiers mais, par voie de conséquence, également sur l'approvisionnement des filières bois en quantité et en qualité. Il est donc important de comptabiliser également le stockage dans les produits forestiers.

D'autre part, les stocks de carbone dans la matière organique du sol sont estimés à près de une fois et demi ceux de la biomasse[5]. Il est alors primordial de prendre également en compte les implications des changements de pratiques sylvicoles sur l'évolution de la quantité de carbone stockée dans les sols.

Outils utilisés

La démarche employée pour répondre à ces questions est la modélisation et la simulation. Nous construisons une chaîne de modèles permettant de prendre en compte les compartiments décrits dans le paragraphe ci-dessus, qui sera exploitée ensuite.

Ces modèles sont soit issus de la littérature, soit précédemment développés au LERFoB (Laboratoire d'Étude des Ressources Forêt Bois), soit élaborés au cours de l'étude.

En particulier, les modèles de croissance sont utilisés compte tenu de l'état de l'art : on ne simule pas l'évolution à venir de la productivité en lien avec les changements climatiques, mais la croissance des peuplements telle qu'elle a été observée et modélisée aujourd'hui.

Sylvicultures envisagées

Une large gamme d'itinéraires sylvicoles est envisagée, aussi bien en termes d'intensité de sylviculture que de diamètre d'exploitabilité. Les simulations sont menées également pour des fertilités contrastées (faible, bonne et très bonne).

Produits forestiers

Comme il a été précisé plus haut, le stock moyen de carbone dans les produits forestiers est également pris en compte dans les simulations.

Par contre, les évolutions du marché du bois que pourrait induire un changement de pratiques sylvicoles, et donc un changement d'approvisionnement, ne sont pas prises en compte. Le marché est considéré absorber l'ensemble de la production de la forêt.

Limitations

Notre étude se borne à estimer les implications sur les stocks de carbone induites par des changements de pratiques sylvicoles, sans estimer les effets collatéraux que sont les modifications de la biodiversité et des impacts socio-économiques qui doivent être appréhendés à un autre niveau.

CONSTRUCTION DES MODÈLES

La croissance des peuplements

Les modèles de croissance utilisés pour les quatre essences étudiées ici sont basés sur des mesures dendrométriques nombreuses. Ils ne permettent pas d'extrapoler la croissance des peuplements dans des conditions de changements climatiques ou stationnels (comme une élévation des températures, un accroissement des taux de CO_2 dans l'atmosphère ou bien des dépôts azotés supérieurs) mais ils possèdent une robustesse qui les rend très fiables pour le type d'utilisation qui en est faite pour cette étude.

La comptabilité du carbone dans la biomasse forestière ligneuse est faite en utilisant des relations allométriques pour connaître les volumes, et des équations de densité et infra-densité pour passer à la matière sèche, à laquelle on applique un taux de carbone fixé à 47,5 % pour toutes les essences.

Le carbone du sol

La prise en compte de l'ensemble du cycle du carbone impliqué dans la filière forêt-bois passe entre autres par les sols. Ce compartiment majeur du point de vue du stock de carbone reste très mal connu[16-20].

Les quantités et variations du carbone du sol avec la sylviculture sont simulées avec le modèle *Century*[18], dont les paramètres et variables d'entrée ont été redéfinis à l'aide des données sur les sols forestiers du réseau européen 16 x 16 km et du réseau RENECOFOR.

Les produits forestiers

Une large partie du déstockage du carbone accumulé dans les peuplements forestiers s'effectue lors des éclaircies, puis lors de la coupe finale. Une fraction est laissée sur le terrain sous forme de rémanents mais la plus grande part est exportée de la forêt, soit pour l'approvisionnement de l'industrie du bois, soit pour l'autoconsommation des ménages. La partie exportée de la forêt va être transformée, utilisée pendant un certain nombre d'années, parfois recyclée. Le carbone retournera alors fatalement à l'atmosphère soit par combustion, soit par décomposition. Entre temps, il contribue

Quelle sera la durée de vie de l'ensemble du bois produit, y compris les pertes dues à la transformation ?

encore au stockage sous la forme de produits forestiers. Cette contribution sera plus ou moins importante suivant la longévité du produit.

Les choix sylvicoles influent donc également sur le stock de carbone par les produits forestiers qu'ils engendrent. Par exemple, une gestion permettant de produire de plus grandes quantités de bois de construction, soit par le choix des essences, soit par le choix des diamètres d'exploitabilité, sera plus bénéfique au stockage qu'une autre, alimentant essentiellement la filière papier-carton. La prise en compte de ce compartiment est alors essentielle. L'objectif de notre étude étant d'estimer l'impact des choix sylvicoles sur le stock de carbone à l'échelle de la parcelle, le problème est appréhendé d'amont en aval : quelle sera la durée de vie de l'ensemble du bois produit, y compris les pertes dues à la transformation et le recyclage.

Principes généraux

L'utilisation conjointe de coefficients de rendement lors des différentes phases de transformation du bois en industrie[23] et d'une analyse de la filière réalisée dans le cadre d'un programme GICC[17] qui la répartit en cinq sous-filières (construction, ameublement, emballage, papier-carton et bois énergie), permet de retracer des cycles de vie des produits et de calculer ce que nous appellerons des « durées de vie apparentes ». Ces durées de vie correspondent à l'espérance de vie d'une quantité de bois qui entre dans la filière, et non une durée de vie du produit fini. Cette approche est plus pertinente dans le cadre de cette étude car l'ensemble de la grume doit être considérée. L'exemple simple suivant permet d'expliciter la notion : si un produit fini a une espérance de vie de 15 ans mais que 60 % de la grume ayant servi à le construire est perdue en chutes ayant une durée de vie de deux ans, alors la durée de vie apparente sera égale à (40 % x 15 ans) + (60 % x 2 ans) = 7,2 ans.

Il s'ensuit que les durées de vie apparentes recalculées ainsi peuvent apparaître très courtes lorsque dans les esprits les produits sont associés aux meubles massifs ou autre usages du bois beaucoup plus longévifs.

Les durées de vie par filière

Afin d'illustrer la manière dont nous avons calculé les durées de vie des produits issus des différentes filières nous proposons d'exposer en détail la réflexion pour la filière bois de construction qui est l'une des plus longévives.

Cette filière regroupe la charpente et la couverture, dans les domaines industriels et domestiques, mais aussi l'utilisation en menuiseries extérieures et en agencement. Une catégorie « autres » est constituée par les produits à durée de vie courte comme le bois de chantier utilisé en coffrage ou échafaudage, ainsi que des produits à durée de vie plus longue comme les étaiements ou les traverses de chemin de fer.

Le schéma de la filière avec les rendements, les pourcentages de répartition et les durées de vie à chaque phase est synthétisé dans la figure 2.

Notre recherche de la durée de vie apparente doit également prendre en compte le recyclage. Il est assez délicat de savoir ce que deviennent les produits après leur utilisation. On considérera que l'ensemble du bois perdu lors des deux transformations ainsi qu'après utilisation finale sera incorporé soit dans la filière bois énergie, soit dans la filière papier-carton. Ces deux filières ayant des durées de vie apparentes proches (respectivement 20 et 29,2 mois), la durée de vie sera prise intermédiaire entre les deux, arbitrairement 24 mois, soit deux ans.

Le calcul de la durée de vie apparente de l'ensemble de la filière en prenant en compte les rendements de fabrication mais pas la réutilisation des produits finis en bois de feu ou en pâte à papier se fait de la manière suivante :

1. Volume perdu après la première transformation :
   - 51 % du volume est écarté après passage en exploitation puis scieries. Durée de vie : 2 mois.
2. Volume perdu après la seconde transformation :
   - 11,5 % x 20 %, correspondant aux pertes dans le secteur « charpente-couverture ». Durée de vie : 3 mois ;
   - 4 % x 30 %, correspondant aux pertes dans le secteur « menuiseries extérieures ». Durée de vie : 3 mois ;
   - 20,8 % x 30 %, correspondant aux pertes dans le secteur « agencement ». Durée de vie : 3 mois ;
   - 12,7 % x 20 %, correspondant aux pertes dans le secteur « autres ». Durée de vie : 3 mois.
3. Volume dans les produits finis :
   - 11,5 % x 80 % en charpente-couverture. Durée de vie : 483 mois ;
   - 4 % x 70 % en menuiseries extérieures. Durée de vie : 243 mois ;
   - 20,8 % x 70 % pour l'agencement. Durée de vie : 183 mois ;
   - 12,7 % x 80 % pour les autres produits. Durée de vie : 63 mois.

On obtient alors une durée de vie apparente hors recyclage de 85,6 mois. Pour prendre en compte le recyclage, il suffit alors d'ajouter 24 mois à toutes les parties du cycle, ou bien 24 mois à la moyenne finale. La durée de vie apparente de l'ensemble de la filière est alors de 109,6 mois, soit 9,1 ans.

Le même raisonnement a été tenu pour les cinq sous-filières et donne les résultats suivants : bois énergie, 20 mois ; papier-carton, 26 mois ; emballage, 3,9 ans ; construction, 9,1 ans ; ameublement, 8,5 ans.

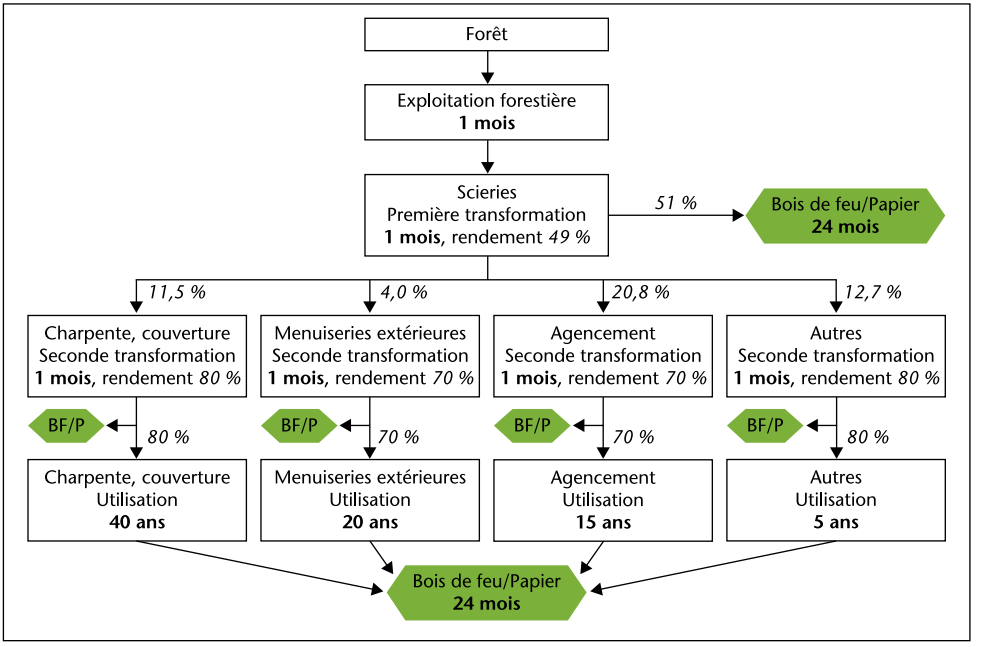


Figure 2 – Cycle de vie de la filière construction (inspiré de RAJI, dans PAQUET et DEROUBAIX[17], SELMANI[23] pour les rendements).

La répartition des arbres en produits

La donnée suivante nécessaire est la répartition du bois exporté du peuplement dans les cinq filières. Différents modèles selon les essences nous ont permis de l'obtenir. La répartition est présentée dans les tableaux 1a et 1b, issus des travaux de FLAMMARION[6] pour les deux feuillus de notre étude. Pour les résineux, nous avons utilisé le logiciel WinEpiFn[9] qui permet de prévoir les sciages des planches en fonction des caractéristiques dendrométriques de l'arbre.

CAPITALISATION SUR PIED

Nous en arrivons maintenant aux questions de notre étude qui consistaient à évaluer l'impact de la sylviculture sur le stockage du carbone dans les peuplements forestiers.

Rappelons ici que les simulations sont conduites en se plaçant exclusivement du point de vue du stockage de carbone, et indépendamment des questions de maintien de la biodiversité et des aspects socio-économiques qui pourraient être abordées par ailleurs.

Les forêts françaises présentent des volumes de bois sur pied en augmentation permanente depuis plusieurs décennies. Ils étaient en moyenne de 128 m^3/ha en 1980 et de 145 m^3/ha en 1991 d'après les données de l'IFN[19]. Les prélèvements sont inférieurs à la production biologique. Cela engendre un stockage du bois en forêt que l'on appelle la capitalisation sur pied.

Diamètre du billon (cm)	%	70-79	60-69	50-59	40-49	30-39	20-39	10-19
A : tranchage	1	X	X	X				
B1 : ébénisterie	4		X	X	X			
B2 : menuiserie fine	10			X	X	X		
C1 : menuiserie ordinaire	15			X	X	X		
C2 : charpente, parquet	15				X	X	X	
T : traverse, ossature	10				X	X		
Bois de feu, pâte à papier	45						X	X

Tableau 1a – Répartition des billons dans les différents types de produits suivant le diamètre milieu du billon de 2 mètres pour le chêne sessile. Les pourcentages donnés correspondent à l'ensemble de la ressource.

Diamètre du billon (cm)	70-79	60-69	50-59	40-49	30-39	20-39	10-19
A : tranchage	X	X	X				
B1 : déroulage		X	X	X			
B2 : ébénisterie		X	X				
C1 : menuiserie			X	X			
C2 : emballage					X	X	
Bois de feu, pâte à papier							X

Tableau 1b – Répartition des billons dans les différents types de produits suivant le diamètre milieu du billon de 2 mètres pour le hêtre.

Ce stockage pourrait devenir pérenne, soit par intérêt de production, soit par des incitations gouvernementales, et la capitalisation sur pied deviendrait alors un puits de carbone qui contribuerait aux objectifs de réduction des émissions de CO_2.

Il est alors nécessaire de savoir estimer quantitativement les gains engendrés par de telles pratiques. Ceux-ci doivent être considérés en fonction des différentes échelles de temps : on devra en effet distinguer ce que l'on appellera le régime transitoire du régime permanent.

Le régime permanent correspond à un état d'équilibre global atteint en pratiquant indéfiniment la même sylviculture sur une station donnée. L'étude des régimes permanents permet alors d'évaluer l'équilibre le plus favorable pour le stockage du carbone à long terme. L'hypothèse a priori est que les peuplements denses constituent des stocks de carbone plus importants que les peuplements clairs.

La problématique du régime transitoire est toute autre et n'aboutit pas nécessairement aux mêmes résultats. En effet, il correspond à la cinétique de passage d'un régime permanent à un autre lorsque les choix sylvicoles sont modifiés. Le ralentissement des taux de coupe pour arriver à un peuplement plus dense va engendrer localement, au moment où cette pratique est effectuée et pour plusieurs années voire décennies, une absorption nette importante de carbone par la forêt. Cela peut permettre de répondre à des objectifs de court ou moyen terme, comme par

exemple un stockage intensif jusqu'à l'horizon 2050, sans que le régime permanent auquel on aboutit soit nécessairement plus favorable.

Régime permanent

Dans nos simulations concernant le chêne sessile, nous avons comparé des sylvicultures à très forte et à très faible densité pour un diamètre-objectif commun de 70 cm avec une fertilité intermédiaire. Pour les scénarios denses, la baisse de l'intensité des éclaircies implique une augmentation du nombre d'arbres au moment de la coupe finale, mais aussi une diminution des diamètres. La durée de révolution n'est alors pas identique pour les deux scénarios mais correspond au temps nécessaire à l'obtention du diamètre dominant objectif de 70 cm. Le tableau 2 reprend les caractéristiques principales des peuplements pour les deux scénarios en chêne sessile en fin de révolution.

Le stock de carbone final a été obtenu en sommant le stock de chacun des compartiments. Pour les produits forestiers, il a été tenu compte qu'à chaque étape d'éclaircie, un certain volume de bois est exporté de la forêt pour entrer dans ce compartiment. Les arbres sont billonnés et répartis dans les différentes filières bois suivant les règles définies plus haut. Ensuite, le retour de carbone à l'atmosphère se fait suivant l'espérance de durée de vie apparente tenant compte des rendements matière lors des transformations. Que ce soit pour le scénario clair ou le scénario dense, les durées de vie des produits forestiers sont très courtes en comparaison de la longueur de la révolution, et le stock de carbone correspondant est très faible en comparaison de celui du peuplement forestier.

La figure 3 montre le bilan des deux scénarios lorsque tous les compartiments sont additionnés. La figure 4 compare les deux situations. On voit que le scénario dense stocke plus de carbone que le clair, en raison à la fois d'un accroissement plus important à âge égal mais aussi car la révolution est plus longue, et le peuplement reste donc plus longtemps au stade où le stock est le plus important. Les moyennes annuelles de stockage sont de 169,7 tC/ha pour le scénario clair contre 247,7 tC/ha pour le scénario dense. La figure 5 indique que les systèmes racinaires, et plus encore la partie aérienne, sont responsables du stock annuel moyen supérieur du scénario dense.

Si l'on compare les stocks dans les produits forestiers pour les deux scénarios, on voit que la sylviculture très dense produit près de deux fois plus de produits que la sylviculture très claire sur des révolutions respectives de 219 et 156 ans, mais les proportions entre les différentes filières sont conservées (figure 6). Notons qu'en volume produit, le secteur bois de feu représente une très large part du volume total. En revanche, sa faible durée de vie en fait la filière contribuant le moins au stock de carbone moyen. Rappelons ici que nous

Tableau 2 – Caractéristiques peuplement des deux scénarios en fin de révolution.

	Âge (an)	**H0** (mètre)	**N** (/ha)	**G** (m^2/ha)	**D0** (cm)
Scénario clair	156	332,2	58	22,3	70,0
Scénario dense	219	40,0	112	42,4	70,1

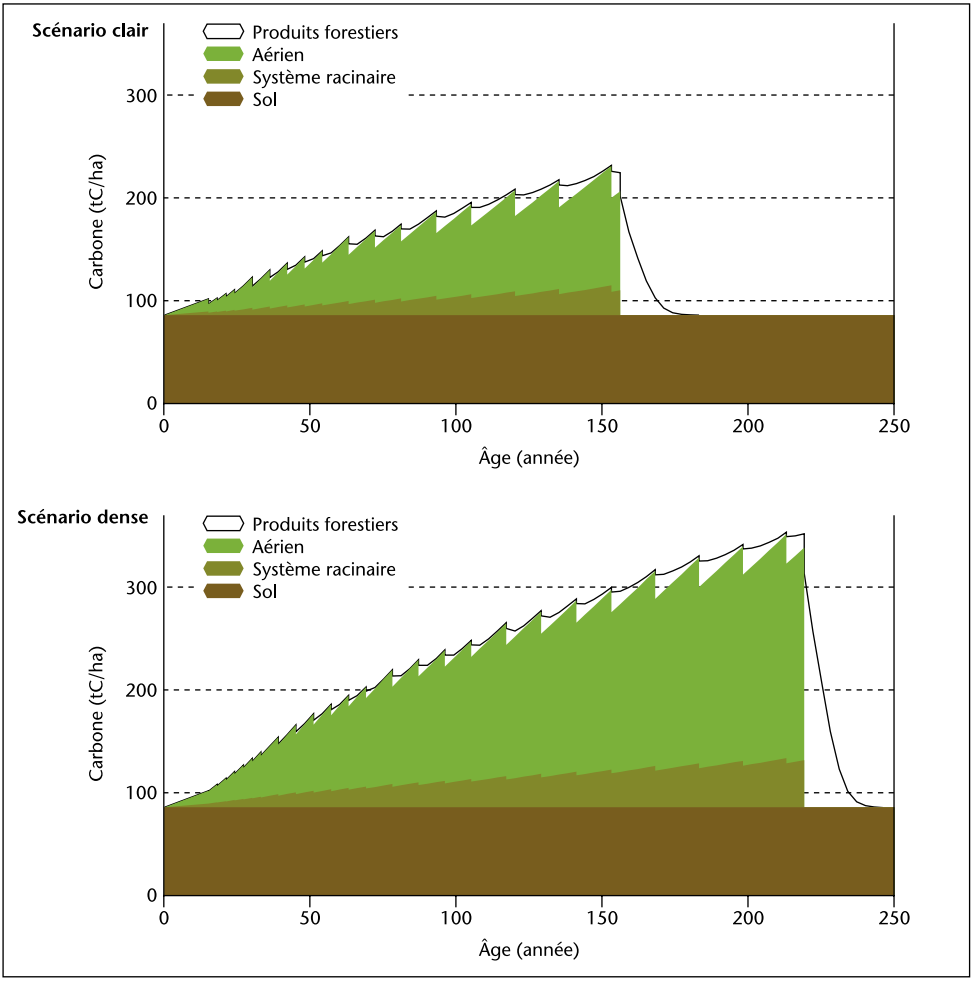


Figure 3 – Bilan global de carbone pour les scénarios clair et dense, en chêne sessile. Les quantités de carbone sont cumulées.

nous intéressons uniquement au stockage de carbone et que la substitution des combustibles fossiles par le bois énergie n'est pas appréhendée.

Les stocks moyens pour une situation type en hêtre sont présentés dans la figure 7. Comme pour le chêne, mais avec des niveaux supérieurs, le scénario dense présente un stock de carbone bien plus élevé que le scénario clair. À nouveau, on observe que les produits représentent une part très minime du stockage moyen avec seulement 5,1 % pour le scénario clair et 3,7 % pour le scénario dense. La part la plus variable du stockage se trouve dans la biomasse aérienne : clair, 28,9 % ; dense, 51,0 %.

Régime transitoire

L'étude du régime transitoire veut répondre à la question : quel serait l'impact immédiat en termes de stockage de carbone d'un

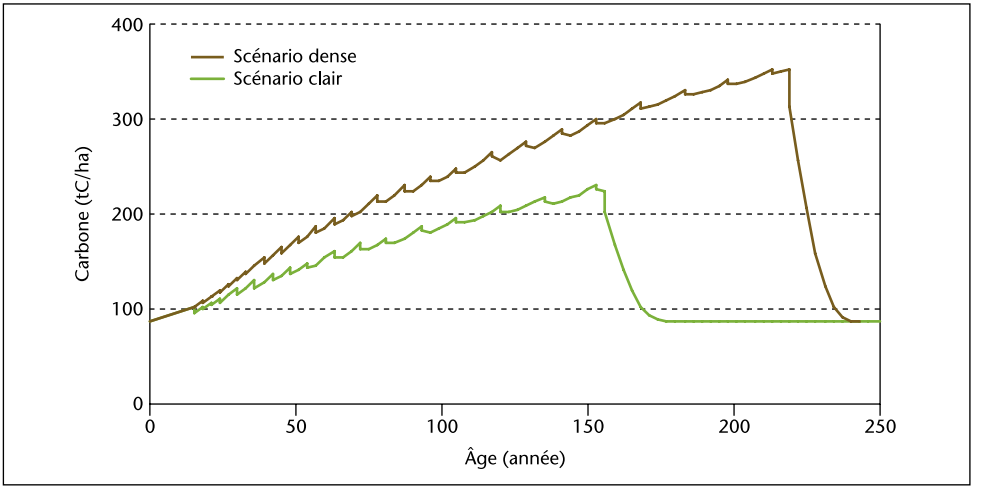


Figure 4 – Comparaison du bilan de carbone total pour les scénarios clair et dense, en chêne sessile.

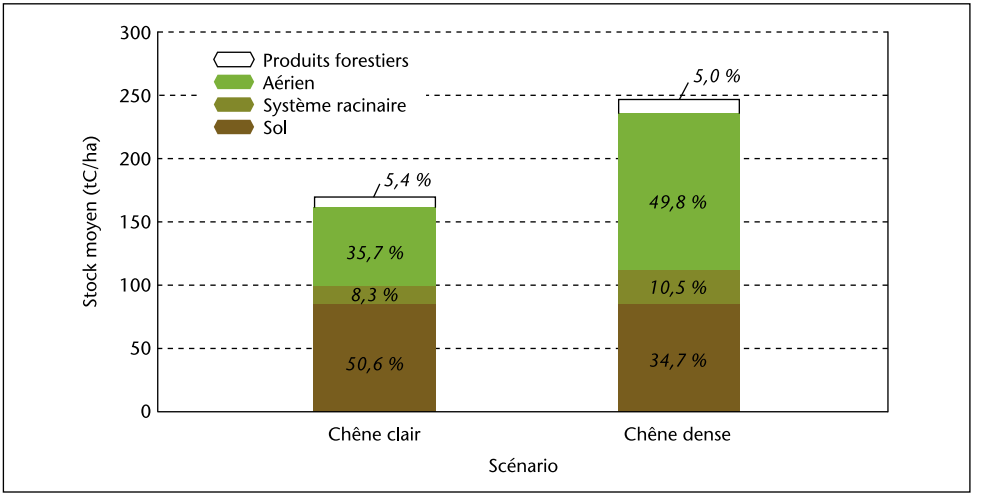


Figure 5 – Stock moyen sur l'ensemble de la révolution par compartiments pour les scénarios clair et dense, en chêne sessile.

arrêt total des prélèvements dans les forêts jeunes et claires jusqu'à atteindre un niveau très dense du stock ? La simulation de ce type d'itinéraire sylvicole montre le stockage maximum qu'il est possible d'effectuer en forêt en un minimum de temps.

Le scénario simulé est celui d'un peuplement de chêne sessile de bonne fertilité (25 mètres à 100 ans) conduit avec une sylviculture dynamique jusqu'à 60 ans et pour lequel on décide d'arrêter les prélèvements jusqu'à obtenir un peuplement dense. Le scénario dynamique – que l'on appelle « scénario initial » – est poursuivi pour effectuer la comparaison et estimer le stockage différentiel, que l'on appellera « surstockage » (figure 8).

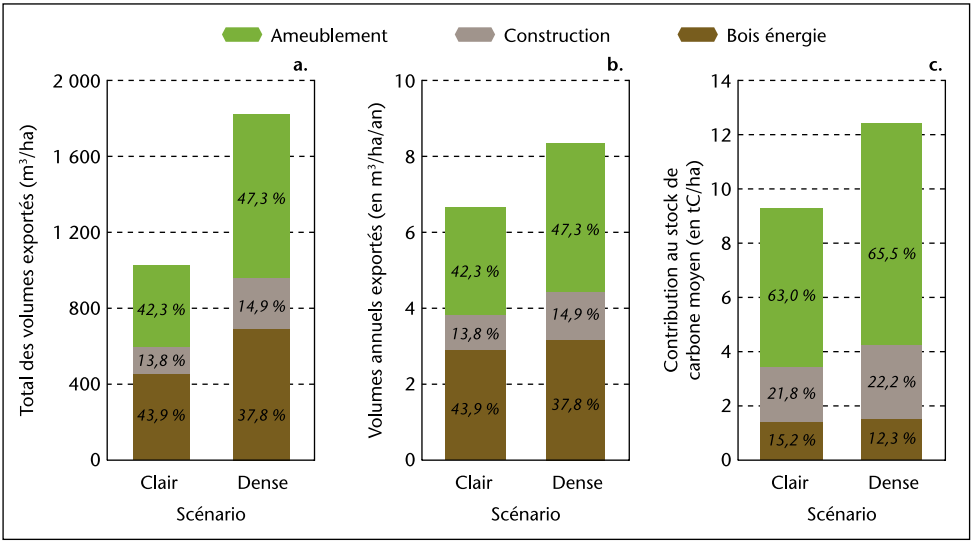


Figure 6 – Produits issus des deux sylvicultures. (a) Volume total exporté sur l'ensemble de la révolution (en m³/ha). (b) Volumes annuels exportés (en m³/ha/an). (c) Contribution au stock de carbone moyen (en tC/ha). Les révolutions sont de 156 ans pour le scénario clair et 219 ans pour le scénario dense.

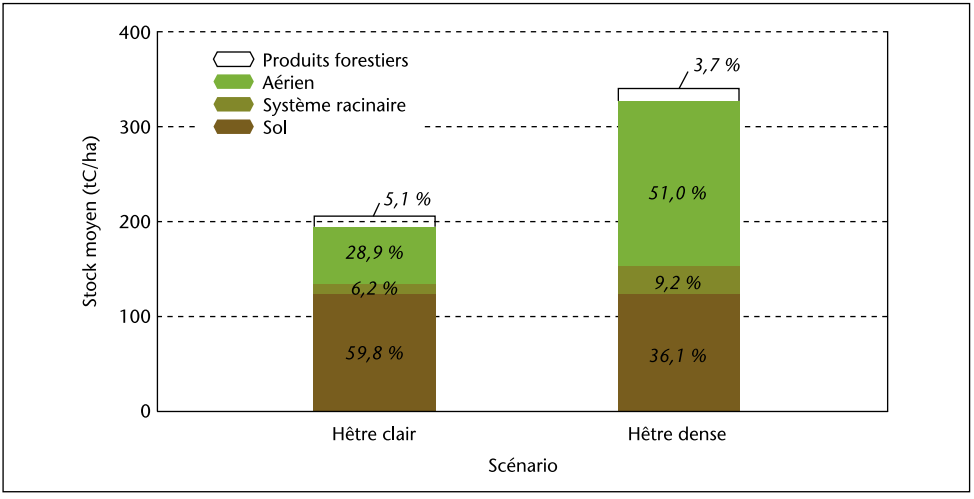


Figure 7 – Répartition du stock moyen de carbone dans les différents compartiments pour deux sylvicultures de hêtre de fertilité bonne (27 mètres à 100 ans en 1950).

Les résultats de notre simulation de stockage de carbone sont exprimés dans la figure 9. Le scénario sylvicole avec une densité proche du maximum autorisé par la loi d'auto-éclaircie engendre un surstockage de carbone pendant un certain nombre d'années. Lorsqu'à 60 ans les prélèvements sont stoppés dans le scénario alternatif, il va y avoir une capitalisation rapide d'environ 60 tC/ha en 33 ans, jus-

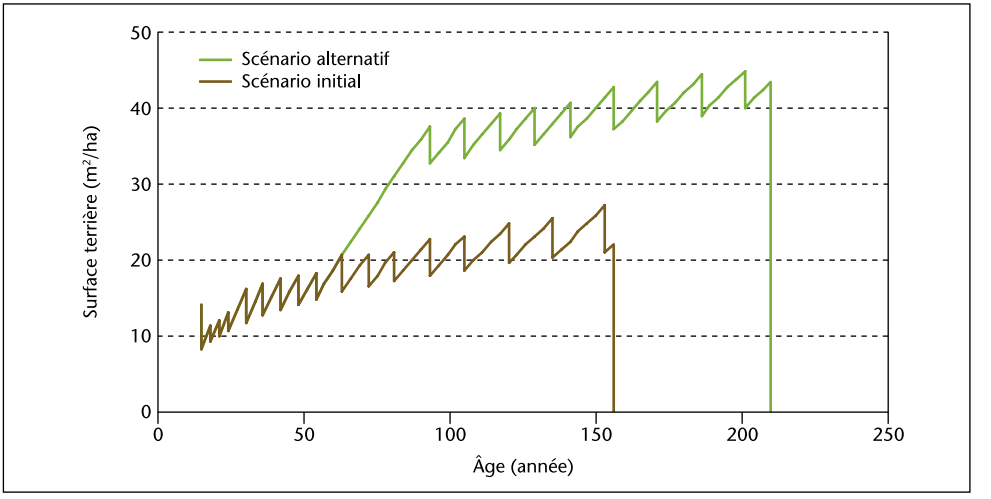


Figure 8 – Surface terrière du peuplement de chêne sessile en fonction du temps pour les scénarios initial et alternatif.

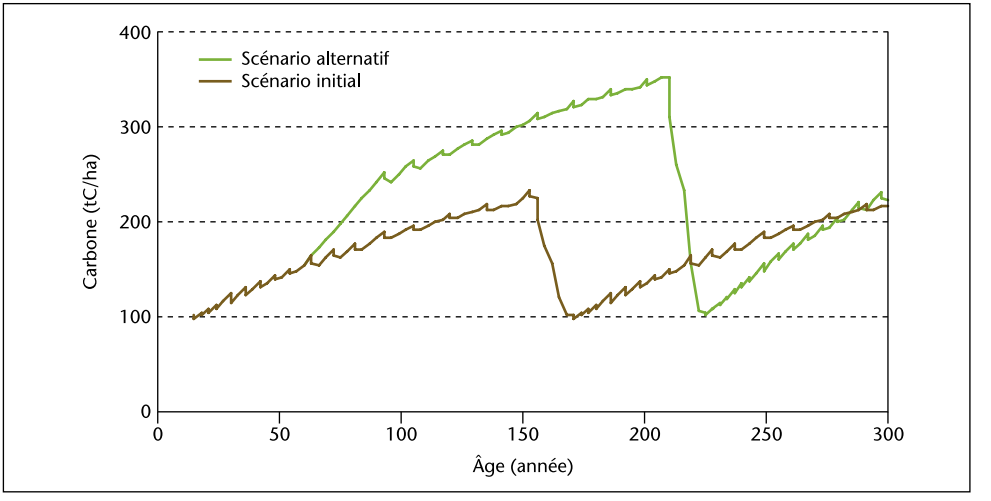


Figure 9 – Évolution des stocks de carbone (tC/ha) pour un exemple de régime transitoire en chêne sessile.

qu'à l'obtention d'un peuplement dense. Des éclaircies sont alors de nouveau effectuées, mais le stockage du carbone reste encore favorable au scénario alternatif.

Ensuite, à 156 ans, le scénario initial atteint le diamètre objectif de 70 cm et la coupe finale a lieu, ce qui entraîne un fort déstockage de carbone. Le scénario alternatif n'ayant pas atteint le diamètre d'exploitabilité, le différentiel de stock lui est très favorable. Enfin, la coupe finale du scénario alternatif intervient à 210 ans, et le stock de carbone passe alors en-dessous de celui du scénario initial.

Si l'on observe la vitesse moyenne de surstockage induite par ce changement de

régime, on obtient une valeur d'environ 67 tC/ha en plus, en 50 ans. Comparé aux valeurs obtenues pour le régime permanent, cela signifie qu'en 50 ans, 86 % de la différence de stockage entre le scénario dense et le clair est déjà obtenu.

Réflexions

Les simulations de scénarios sylvicoles de capitalisation sur pied montrent que cette stratégie présente un intérêt non négligeable pour le piégeage du carbone. Le tableau 3 fait une synthèse des stocks moyens de carbone sur l'ensemble de la révolution obtenus en régime permanent pour trois classes de fertilité et pour les scénarios les plus extrêmes.

Attention cependant : les scénarios très clairs et très denses présentés sont des itinéraires sylvicoles extrêmes. Tous les peuplements de chêne sessile et de hêtre ne doivent pas être considérés comme présentant d'ores et déjà ces sylvicultures et il serait absolument faux de vouloir multiplier les différentiels reportés ici par les surfaces observées pour donner une idée des potentiels de stockage par capitalisation sur pied à l'échelle de la ressource nationale. De plus, rappelons de nouveau que le choix de capitaliser le carbone en forêt ne serait pas neutre aux niveaux social, économique et environnemental.

Pour replacer ces valeurs dans leur contexte, rappelons que les émissions de CO_2 de la France pour l'année 1990 sont estimées à 372 $MtCO_2$[4], ce qui correspond à 101,8 MtC. Le passage du régime permanent d'un hectare de chêne sessile ou de hêtre d'une sylviculture très claire à une sylviculture très dense représente alors approximativement un millionième des émissions de CO_2 de l'année 1990.

Afin de donner une estimation des potentialités de stockage à l'échelle de la ressource nationale, il faudrait travailler sur de grands massifs forestiers en connaissant les distributions de densité, d'âge et de fertilité de chacune des deux essences.

L'étude du régime transitoire sur un cas particulier montre qu'il est très probable que le nouvel équilibre soit atteint assez rapidement, dans un temps bien inférieur à celui de la révolution forestière.

Remarque sur la place des produits forestiers

La part des produits forestiers dans les stocks de carbone est très faible avec seulement 5 % du stock moyen en régime

Tableau 3 – Stocks de carbone moyen en régime permanent pour le chêne sessile et le hêtre suivant différentes fertilités et pour deux scénarios sylvicoles très contrastés.

	Fertilité	Scénario très clair	Scénario très dense	Différence
Chêne sessile	faible	161 tC/ha	232 tC/ha	71 tC/ha
	bonne	170 tC/ha	248 tC/ha	78 tC/ha
	très bonne	178 tC/ha	264 tC/ha	86 tC/ha
Hêtre	faible	202 tC/ha	332 tC/ha	130 tC/ha
	bonne	205 tC/ha	340 tC/ha	135 tC/ha
	très bonne	211 tC/ha	353 tC/ha	142 tC/ha

permanent environ. Deux facteurs expliquent ce constat. Tout d'abord le référentiel par rapport auquel on compare la longévité des produits forestiers : les révolutions de nos simulations varient entre 84 et 255 ans, c'est beaucoup. Le second facteur concerne le choix que nous avons fait de prendre en compte les durées de vie apparentes, c'est-à-dire des espérances de vie d'un billon exporté de la forêt. La part approximative d'un billon devenant un produit fini est de 35 % seulement, les 65 % restants sont des co-produits de faible longévité.

Un élément supplémentaire peut altérer le jugement et rendre ce résultat contraire aux a priori : lorsque les produits forestiers sont évoqués, les idées reçues nous montrent les poutres des vieilles maisons ou les armoires normandes. Ces produits là ont des durées de vie extrêmement longues mais ne sont qu'une infime partie du bois exporté de la forêt.

À titre d'exemple, dans le cas d'un peuplement de chêne de fertilité et de sylviculture moyenne, seulement 14 % des volumes exportés sont affectés à la filière construction. Ce volume va subir la première transformation qui va générer 51 % de pertes. Les 7 % du volume restant sont répartis dans différentes sous-filières et il ne restera alors que 1,6 % dans la sous-filière la plus longévive qu'est la charpente. Dans cette filière, il y a 20 % de pertes lors de la seconde transformation, d'où un pourcentage final en charpente de 1,29 % du volume exporté de la forêt. Enfin, cette fraction a une longévité de 40 ans seulement car les charpentes ne sont pas seulement celles des maisons individuelles mais aussi celles des charpentes industrielles qui ont des durées de vie plus courtes.

Cet exemple illustre le décalage entre les idées reçues quant au stockage du carbone dans la charpente en comparaison avec la longévité des billons sortis de la forêt. Cette analyse ne signifie pas que le stockage dans les produits forestiers est inutile mais seulement qu'il est faible en comparaison de celui des stocks sur pied de la forêt.

LA STRATÉGIE DE SUBSTITUTION

La deuxième stratégie sylvicole étudiée avec la chaîne de modèles est la substitution d'essences. Cela correspond au remplacement d'un peuplement de feuillus à croissance lente par une plantation de résineux à croissance rapide.

Si le résineux pousse plus rapidement que le feuillu, on peut s'attendre à ce que les accroissements de stocks de carbone soient supérieurs et que cette pratique génère alors un puits de carbone plus fort.

Les résultats que nous avons obtenus pour le régime permanent sont les suivants.

Dans la région Centre et Pays de la Loire, dans laquelle nous avons simulé une substitution des peuplements de chêne sessile par des plantations de pin laricio, on observe que dans tous les cas la substitution n'est pas souhaitable pour des stratégies de stockage de carbone à long terme. Cela s'explique par le fait que le stock de carbone du sol varie très peu et que celui de la biomasse aérienne et racinaire est bien plus favorable aux peuplements de chêne. Bien que le pin laricio soit plus productif que le chêne sessile, la longévité du second entraîne un temps à l'état mature bien plus long, ce qui est favorable au stockage de carbone.

Pour le couple de substitution hêtre/douglas dans le Massif Central, le constat est plus mitigé et dépend de la fertilité de la station et du choix de sylviculture appliqué. Pour des peuplements de hêtre moins fertiles le bilan pourrait être positif en faveur du douglas. Dans le cas de stations fertiles, le peuplement de hêtre devrait être remplacé par des peuplements de douglas à révolution longue, pour que la balance penche en faveur du douglas. Et encore, notre étude se basait sur une sylviculture très dynamique du hêtre. Or, nous avons vu que le potentiel de stockage par capitalisation en hêtre était très fort. Avec une sylviculture moins dynamique pour le hêtre, le bilan de la substitution lui serait alors favorable.

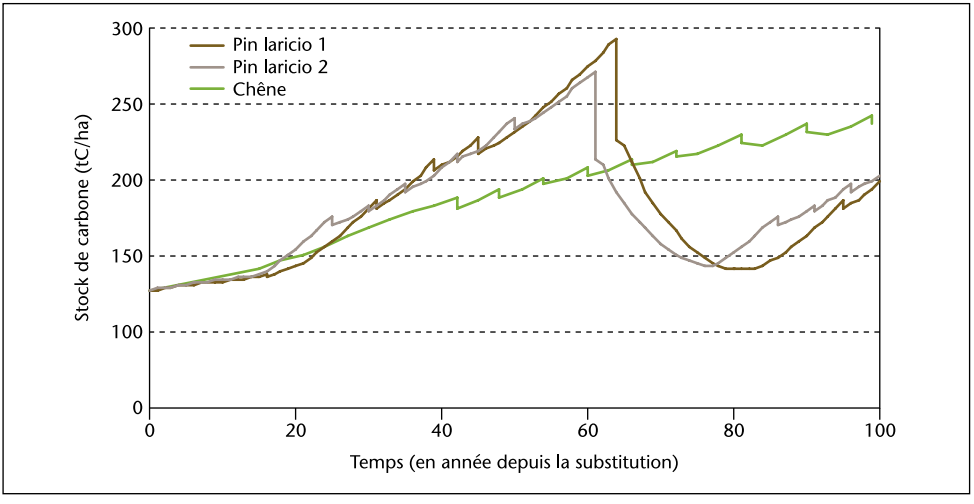
En ce qui concerne le régime transitoire, le bilan est positif pendant plusieurs décennies dans tous les cas, même si les peuplements de feuillus ont de bonnes productivités (figures 10 et 11).

En revanche, pour le couple de substitution chêne sessile/pin laricio, ce surstockage est temporaire et ne donne qu'un répit dans la lutte contre les gaz à effet de serre puisqu'après la première révolution du résineux, le stock retourne très rapidement à l'atmosphère.

Le constat est identique lorsque des peuplements de douglas se substituent à des stations de hêtre de bonne fertilité. Par contre, il semble que pour les stations peu fertiles de hêtre, l'installation de douglas est plus favorable qu'une sylviculture dynamique du feuillu.

L'intérêt de la substitution d'essence dépend donc de l'échelle de temps à laquelle on est confronté. Si l'objectif est un stockage rapide et immédiat du carbone pour 40 à 60 ans, la substitution de feuillus à croissance lente par des résineux à croissance rapide est une stratégie qui pourrait porter ses fruits, en particulier sur les sta-

Figure 10 – Évolution du carbone total (en tC/ha) pour le couple chêne sessile/pin laricio dans le cas le plus favorable à la substitution.



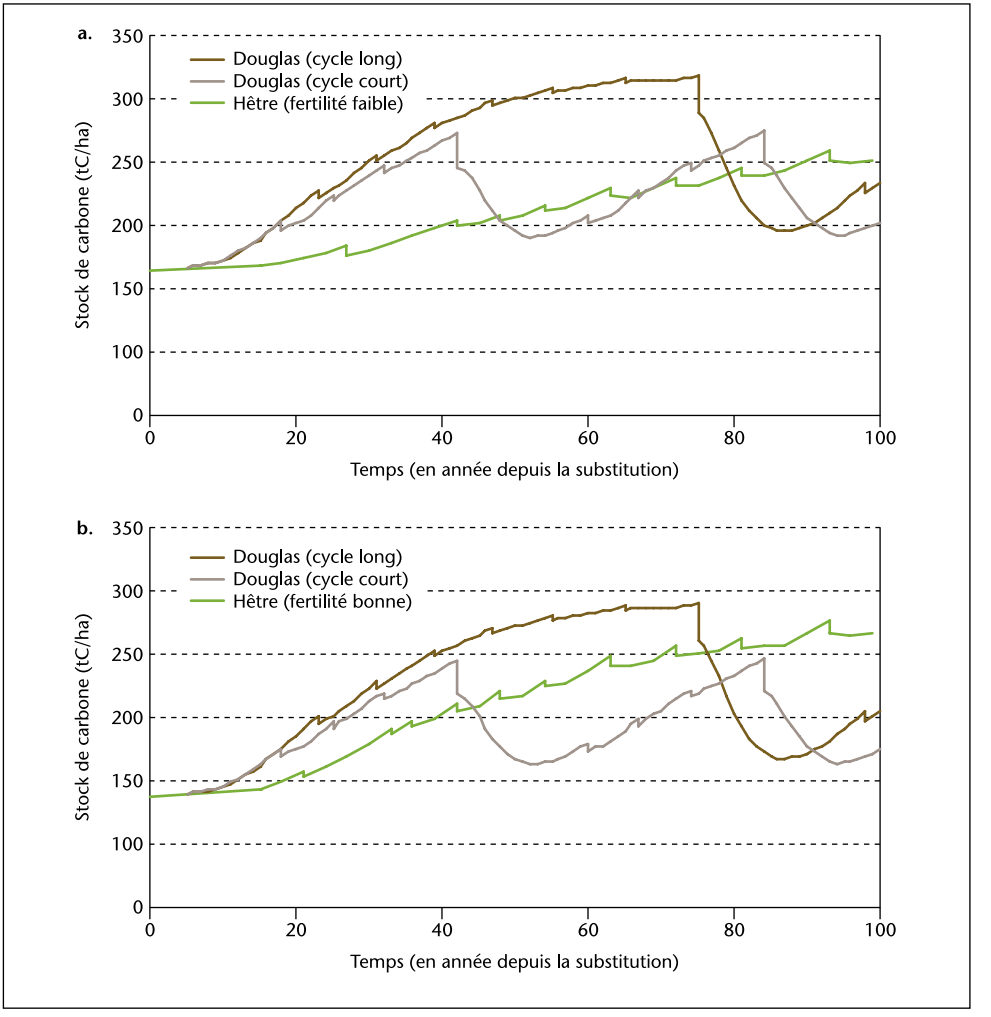


Figure 11 – Évolution du carbone total (en tC/ha) pour le couple hêtre/douglas : (a) dans le cas le plus favorable à la substitution (station à 800 mètres d'altitude) ; (b) dans le cas le moins favorable à la substitution (station à 300 mètres d'altitude).

tions pauvres. En revanche, cette substitution n'est probablement pas la meilleure stratégie à plus long terme, voire très défavorable dans certains cas. À l'échelle d'un ou plusieurs siècles, le stockage de carbone serait supérieur en gardant les feuillus à croissance lente, pour lesquels la capitalisation sur pied engendrerait des stocks moyens supérieurs.

CONCLUSION

D'autres expériences menées dans des pays différents[1-10] montrent des résultats similaires aux nôtres : une forte augmentation du stockage de carbone dans la biomasse lorsque l'on densifie la forêt et une faible variation du carbone du sol. Ce

résultat montre l'intérêt des peuplements hyperdenses, comme les peuplements en réserve. Cependant, il faudrait également effectuer une analyse des divers risques encourus comme les tempêtes, les feux, les pestes… qui pourraient modifier les bilans par l'augmentation de la vulnérabilité de ces forts stocks.

Ensuite, notons que les objectifs de stockage de carbone sont probablement conciliables avec les objectifs forestiers pour le chêne. En effet, un peuplement dense permet d'obtenir des bois de qualité. En revanche, il y a un conflit dans le cas du hêtre dont les largeurs de cerne élevées sont plus prisées et dont la croissance doit être rapide pour l'objectif commercial, donc avec des sylvicultures intensives.

Enfin, rappelons que ce travail consistait à n'envisager que l'évolution des stocks de carbone forestiers avec la sylviculture. Une autre stratégie pour la lutte contre l'augmentation du CO_2 atmosphérique serait la substitution des énergies fossiles par la biomasse, qui impliquerait une diminution des stocks. Les capacités actuelles des forêts françaises permettent d'envisager cette solution[8-26]. Ces deux stratégies sont antagonistes, et leurs bénéfices et défauts devraient être étudiés plus finement. ■

BIBLIOGRAPHIE

[1] BATEMAN I.J., LOVETT A.A. [2000]. Estimating and valuing the carbon sequestered in softwood and hardwood trees, timber products ans forest soils in Wales. *Journal of environmental Management* **60**(4) : 301-323.

[2] CANNELL M.G.R. [1995]. *Forests and the global carbon cycle in the past, present and future.* Research Report n° 2, European Forest Institute, 66 p.

[3] CANNELL M.G.R. [2003]. Carbon sequestration and biomass energy offset : theoretical, potential and achievable capacities globally, in Europe and the UK. *Biomass and Bioenergy* **24**(2) : 97-116.

[4] CITEPA (Centre Interprofessionnel Technique d'Études de la Pollution Atmosphérique) [1994]. *Estimation des émissions de gaz à effet de serre en France de 1990 à 1993*. In : MORTIER F. [1995]. Le CO_2 et la forêt. Office National des Forêts, *Bulletin Technique* **29** : 160 p.

[5] DUPOUEY J.-L., PIGNARD G., BADEAU V., THIMONIER A., DHÔTE J.-F., NEPVEU G., BERGES L., AUGUSTO L., BELKACEM S., NYS C. [1999]. Stocks et flux de carbone dans les forêts françaises. *Comptes rendus de l'Académie d'Agriculture de France* **85**(6) : 293-310.

[6] FLAMMARION J.-P. [1986]. *Regroupement en lots par classes de diamètre*. Rapport interne, Laboratoire d'Économie Forestière, Engref, Nancy.

[7] GALINSKI W. [2005]. *Country decisions concerning forests in the Kyoto Protocol ; options for inclusion of forests in a post 2012 climate agreement.* Summary of two workshops in Graz, Austria. Communication orale dans *Management of forests ecosystems and its impact on the GHG budget*, Savonlinna, Finland, 26-28 août 2005.

[8] GINISTY C., VALLET P., CHABÉ-FERRET S., LEVESQUE C., CHAUVIN C. [2007]. *Disponibilités en biomasse forestière pour des usages énergétiques et industriels en France*. Note de synthèse, Convention DGFAR/Cemagref E19/06, 6 p.

[9] HOULLIER F., LEBAN J., COLIN F. [1995]. Linking growth modelling to timber quality assessment for Norway spruce. *Forest Ecology and Management* **74**(1-3) : 91-102.

[10] HYNYNEN J., AHTIKOSKI A., SIITONEN J., SIEVANEN R., LISKI J. [2005]. Applying the MOTTI simulator to analyse the effects of alternative management schedules on timber and

non timber production. *Forest Ecology and Management* **2007**(1-2) : 5-18.

[11] IPCC [2000]. *Land use, land-use change, and forestry.* Special report, Cambridge University Press, 377 p.

[12] IPCC [2001]. *Climate change 2001 : Synthesis Report*. Summary for Policymakers, 37 p.

[13] KEELING C.D., WHORF T.P. [2005]. *Atmospheric CO_2 concentrations (ppmv) derived in situ air samples collected at Mauna Loa Observatory, Hawaii*. Disponible à l'adresse internet cdiac.esd.ornl.gov/ftp/trends/co2/maunaloa.co2.

[14] KOHLMAIER G.H., WEBER M., HOUGHTON R.A. [1998]. *Carbon dioxide mitigation in forestry and wood industry*. Springer-Verlag, Berlin, Germany, xxix + 375 p.

[15] LINDNER M. [1998]. *Implementing carbon mitigation measures in the forestry sector - a review.* In : KOHLMAIER G.H., WEBER M., HOUGHTON R.A., editors. *Carbon dioxide mitigation in forestry and wood industry : papers based on an international workshop*. Springer-Verlag, Berlin, Germany : 167-184.

[16] MALHI Y., BALDOCCHI D.D., JARVIS P.G. [1999]. The carbon balance of tropical, temperate and boreal forests. *Plant, Cell and Environment* **22**(6) : 715-740.

[17] PAQUET P., DEROUBAIX G. [2003]. *Extension de l'éligibilité de la séquestration forestière du carbone à l'ensemble des stocks de la filière bois*. Coordination CTBA. Rapport à l'ADEME pour le Programme GICC, 148 p.

[18] PARTON W.J., SCHIMEL D.S., COLE C.V., OJIMA D.S. [1987]. Analysis of factors controlling soil organic matter levels in Great Plains grasslands. *Soil Science Society of America Journal* **51**(5) : 1 173-1 179.

[19] PIGNARD G. [2000]. Évolution récente des forêts françaises : surface, volume sur pied, productivité. *Revue Forestière Française,* numéro spécial 2000 : 27-36.

[20] PIGNARD G., DUPOUEY J.-L., ARROUAYS D., LOUSTEAU D. [2000]. Carbon stocks estimates for French forests. *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement* **4**(4) : 285-289.

[21] PRIEUR A. [2004]. *Les ressources forestières : produits du bois, usages énergétiques, capture et stockage de carbone*. Thèse de Doctorat, Université Bordeaux I, 183 p.

[22] ROBERT M., SAUGIER B. [2003]. Contribution des écosystèmes continentaux à la séquestration du carbone. *Comptes Rendus Géoscience* **335**(6-7) : 577-595.

[23] SELMANI Y. [1992]. *Analyse des flux physiques de bois à l'intérieur de la filière bois*. Thèse de Doctorat, Engref, Nancy, 241 p.

[24] UNFCCC [1997]. *Le Protocole de Kyoto*. Disponible à l'adresse internet unfccc.int, 24 p.

[25] VALLET P., DHÔTE J.-F., LE MOGUÉDEC G., RAVART M., PIGNARD G. [2006]. Development of total aboveground volume equations for seven important forest tree species in France. *Forest Ecology and Management* **229**(1-3) : 98-110.

[26] VALLET P., LEVESQUE C., GINISTY C. [2007]. *Biomasse forestière disponible pour de nouveaux débouchés énergétiques et industriels. Partie 2 : Calcul des volumes*. Convention DGFAR/Cemagref E19/06, 76 p.

Cet article est issu d'une thèse de doctorat défendue en 2005 à l'École Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts (ENGREF).

PATRICK VALLET
patrick.vallet@cemagref.fr
CEMAGREF, Unité de Recherches Écosystèmes Forestiers
Domaine des Barres
F-45290 Nogent-sur-Vernisson