
STOCKS ET FLUX DE CARBONE DANS LES FORÊTS FRANÇAISES

J.-L. DUPOUEY – G. PIGNARD – V. BADEAU
A. THIMONIER – J.-F. DHÔTE – G. NEPVEU
L. BERGÈS – L. AUGUSTO – S. BELKACEM – C. NYS

NDLR

Cet article a fait l'objet d'une conférence à l'Académie d'Agriculture de France (colloque des 18 et 19 mai 1999) et a été publié dans les Comptes-rendus de l'Académie d'Agriculture de France, vol. 85, n° 6, 1999. Il est reproduit ici avec l'aimable autorisation de l'Académie.

D'après la synthèse de Kohlmaier *et al.* (1998), les forêts occupent actuellement 29 % de la surface des terres émergées. Leur part dans le stock de carbone des sols est proportionnellement plus importante (36 % des 1 600 GtC), de même que leur part dans le flux net annuel de carbone de l'atmosphère vers la biomasse dû à la production primaire (44 % des 50 GtC/an). Mais surtout, elles contiennent la plus grande partie (81 %) du carbone stocké dans la biomasse vivante de la biosphère, qui s'élève à 560 GtC. Ce stock est du même ordre de grandeur que celui de l'atmosphère (750 GtC). En comparaison, les émissions annuelles d'origine anthropique sont estimées à 7,1 GtC/an (5,5 GtC/an dus aux émissions de carbone fossile, et 1,6 GtC par déforestation). Un accroissement du stock de carbone dans les forêts permettrait de compenser une partie de ces émissions d'origine anthropique.

Le premier constat est que cette solution ne peut être utilisée que pour une période de temps limitée, puisque les surfaces terrestres potentiellement forestières sont elles-mêmes limitées, alors que les réserves potentiellement utilisables de carbone fossile dépassent largement ce qu'il serait possible de stocker en forêt (Rogner, 1997). À plus ou moins long terme, aucune stratégie basée sur la seule gestion des forêts ne permettra donc d'éviter la nécessaire diminution des émissions de carbone fossile. Le problème est d'estimer l'intérêt, les limites, la vitesse de mise en œuvre et les coûts économiques et écologiques associés aux différentes stratégies de maintien ou d'augmentation du pool de carbone forestier.

Si la première action à mener dans les zones tropicales concerne la limitation des émissions dues aux déforestations, les options possibles dans les pays industrialisés, où les surfaces forestières sont généralement en augmentation, sont beaucoup plus variées. À partir du calcul des stocks et des flux de carbone dans les forêts françaises, nous présentons ici quelques éléments de discussion concernant ces différents choix.

Le stock de carbone des forêts ne peut être dissocié, dans ces choix, du pool de carbone constitué par les produits forestiers exportés hors de la forêt, et non encore retourné dans l'atmosphère par décomposition ou combustion. Ce pool, de valeur non précisément connue, a un rôle d'autant plus important que le bois peut être utilisé en remplacement soit directement d'énergies fossiles, soit de matériaux à fort coût énergétique. On peut donc, en régulant l'utilisation des produits de la forêt, et non pas seulement leur quantité, participer à la baisse des émissions de carbone fossile. Les choix liés au mode d'utilisation de la ressource bois ont donc un effet direct et à long terme sur les émissions de carbone fossile, contrairement à ceux liés à la seule gestion de la forêt. Nous n'étudions pas ce pool ici, mais nous montrons la forte interdépendance entre les choix sylvicoles et ceux concernant l'utilisation du bois.

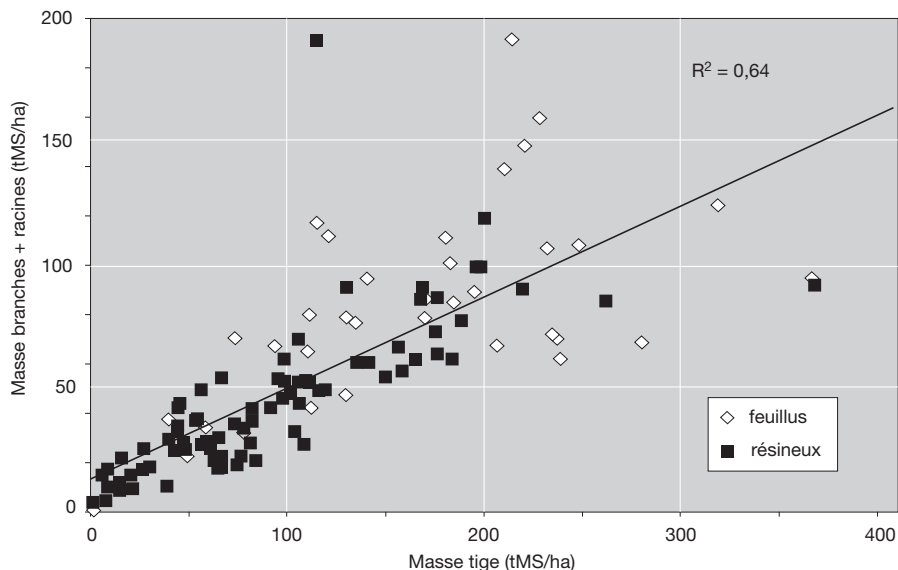
QUEL EST LE STOCK ACTUEL DE CARBONE DANS LES FORÊTS FRANÇAISES ?

Le stock de carbone des forêts françaises comprend le carbone des arbres vivants, du bois mort sur pied et au sol (nécromasse), de la végétation du sous-bois (herbacées et ligneux bas), de la litière et de la matière organique du sol. Les animaux ne représentent qu'une part très faible de ce stock (quelques centaines de kg/ha au maximum) et ne sont pas considérés ici.

Stock de carbone dans la biomasse

Notre calcul repose sur le fait que, d'une part, le bois des troncs contient une large part du carbone des forêts et que, d'autre part, la biomasse des branches et racines est proportionnelle à celle des troncs (figure 1, ci-dessous).

Figure 1 **RELATION ENTRE LA BIOMASSE DES BRANCHES ET RACINES ET CELLE DE LA TIGE (bois fort sur écorce)**
DANS 119 PEUPELEMENTS DES FORÊTS TEMPÉRÉES, BORÉALES ET MÉDITERRANÉENNES D'EUROPE
D'après Cannell, 1982 (modifié)



On peut donc, à partir de coefficients de transformation adéquats, passer du volume bois fort (volume sur écorce de la tige, arrêté à la découpe 7 cm) mesuré par l'Inventaire forestier national français (IFN) à la masse de carbone des forêts françaises.

Ce passage est fait par application, selon les espèces et pour chaque arbre échantillonné dans les placettes IFN, de la formule suivante :

$$C = VIFN * DEN * FEB * FER * CAR$$

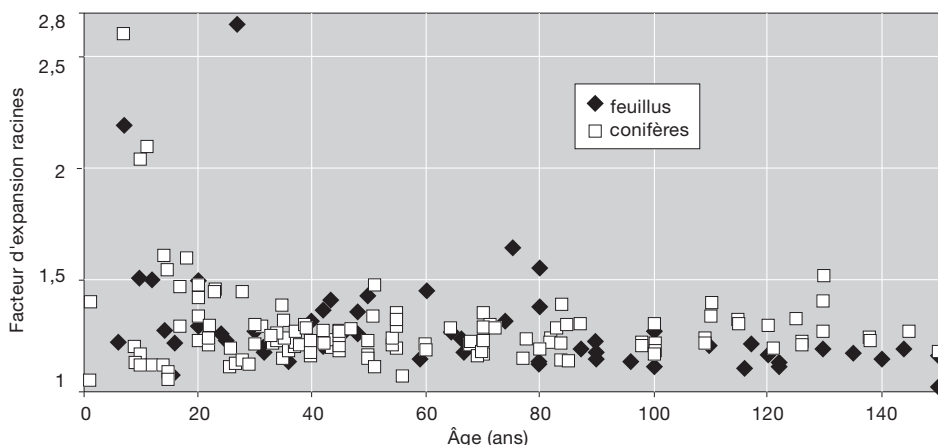
où C est la masse de carbone pour l'espèce considérée, VIFN son volume bois fort mesuré par inventaire, DEN l'infradensité du bois (masse anhydre du bois rapportée à son volume à l'état vert), FEB le facteur d'expansion branches (rapport de la masse ligneuse aérienne totale à la masse des tiges), FER le facteur d'expansion racines (rapport de la masse ligneuse totale à sa masse ligneuse aérienne) et CAR le taux de carbone moyen.

L'inventaire des volumes étant effectué par l'IFN avec une périodicité de dix ans, à raison d'une dizaine de départements par an, notre calcul prend en compte le dernier cycle complet de mesures qui s'est effectué entre 1982 et 1998. La date moyenne des mesures, pondérées par les surfaces inventoriées, est 1991.

Les facteurs d'expansion branches et racines sont issus d'une large étude bibliographique. Pour les chênes et les hêtres de futaie, les facteurs d'expansion branches sont connus avec une bonne précision depuis les travaux de Bouchon *et al.* (1981), et varient avec le volume — et donc l'âge — des arbres. Nous nous sommes appuyés sur les synthèses de Cannell (1982) et Vogt *et al.* (1996) pour tous les autres cas. Nous avons utilisé des valeurs basses de ces facteurs, correspondant aux stades adultes, qui tendent donc à minimiser les stocks calculés. Ces facteurs d'expansion, qui peuvent varier fortement selon l'essence, l'âge, la région ou la sylviculture (figure 2, ci-dessous), constituent une source d'erreur importante dans nos calculs. L'infradensité du bois de chaque essence a été elle aussi fixée à partir d'une étude bibliographique, en choisissant une valeur moyenne ne prenant pas en compte les variations intra-arbre.

Figure 2

VARIABILITÉ DU FACTEUR D'EXPANSION RACINES
(rapport de la masse totale ligneuse du peuplement à sa masse ligneuse aérienne)
D'APRÈS L'ANALYSE BIBLIOGRAPHIQUE DE 240 PEUPELEMENTS
DES ZONES TEMPÉRÉES, BORÉALES ET MÉDITERRANÉENNES
D'après Cannell, 1982 et Vogt *et al.*, 1996 (modifié)



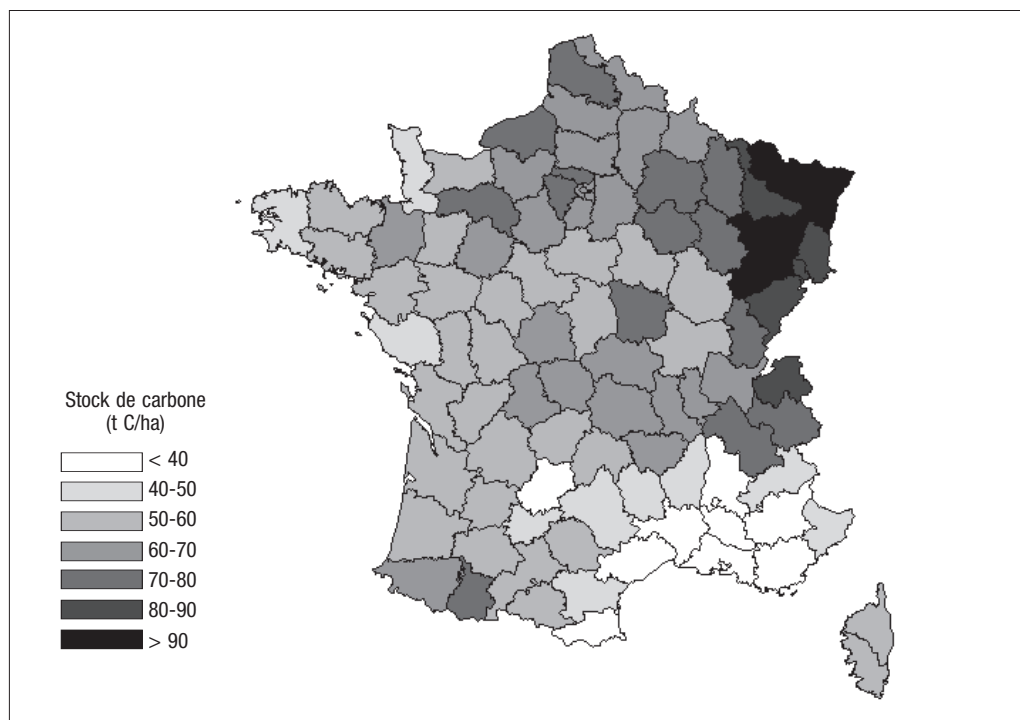
Dans les taillis, ou pour les brins de taillis des taillis-sous-futaie, nous avons directement calculé la masse de bois des arbres à partir des relations allométriques fournies par Auclair et Bige (1984).

Il faut souligner la faiblesse des connaissances actuelles des facteurs de variation du taux de carbone du bois, qui varie cependant peu (entre 45 et 55 %) et qui a été fixé ici uniformément à 50 %.

Le stock de carbone dans le sous-étage (comprenant les arbustes de diamètre à 1,30 m inférieur à 7,5 cm, la végétation herbacée et le bois mort à terre, non comptabilisés par l'Inventaire forestier national) a été fixé à une valeur moyenne — prudente — de 1 tC/ha (2,5 tC/ha dans les pineraies landaises et les peupleraies), à partir d'une analyse bibliographique. On observe en fait des valeurs variant entre quelques kilogrammes de matière sèche par hectare (sous-étage de hêtraies adultes denses sur sols acides) et plus de 20 tonnes (sous-étage de pineraies ou peupleraies ouvertes sur sols riches ou humides par exemple). Seul un couplage des données de l'IFN avec une cartographie exhaustive des types de stations forestières en France et des mesures directes du stock de bois mort au sol permettraient d'affiner cette partie du calcul. La biomasse foliaire par hectare a été estimée, en différenciant feuillus et résineux et taillis-sous-futaie et futaies, à partir de la littérature.

Nous obtenons finalement pour la France un stock moyen de 59 tC/ha, soit, pour les 14,5 millions d'hectares de forêt française en 1991 (SCEES, 1992), un stock total de 860 MtC. Cette valeur est nettement supérieure aux valeurs précédemment calculées [620 MtC selon DERF (1995)]. Le stock se répartit, en moyenne sur l'ensemble du territoire, entre 75 % de bois fort et branches, 15 % de racines d'arbres de futaie, 6 % de feuilles et 4 % dans le sous-étage et la nécromasse.

Figure 3 **STOCK MOYEN DE CARBONE PAR UNITÉ DE SURFACE DANS LA BIOMASSE FORESTIÈRE, PAR DÉPARTEMENT** (Source IFN)



Le volume bois fort moyen mesuré en France lors du dernier inventaire est de 147 m³/ha. Le coefficient global permettant de passer du volume unitaire de bois fort IFN en m³/ha à la quantité de carbone stockée en tC/ha est donc de 0,4 (59/147). Ce coefficient varie surtout en fonction du traitement sylvicole, entre futaies (0,37), taillis-sous-futaie (0,46) et taillis (0,50). Il diffère peu entre essences ou régions, ce qui permet d'étendre aux stocks de carbone à peu près toutes les grandes tendances déjà connues quant à la répartition des volumes de bois fort en France (Pignard, 2000 ; SCEES, 1997). De fortes disparités apparaissent entre espèces dominantes, classes d'âges, structures des peuplements ou régions. Les records de masse de carbone par hectare sont observés pour les douglasaies matures de la région Rhône-Alpes, avec des valeurs atteignant plus de 180 tC/ha dans les peuplements les plus âgés.

Le facteur de variation du stock de carbone par hectare ayant le rôle le plus fort est bien évidemment 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). Les futaies régulières et les taillis-sous-futaie contiennent la même quantité de carbone dans la biomasse, en moyenne 67 tC/ha, les futaies irrégulières 59 tC/ha, et les taillis 32 tC/ha. Les régions de plus fort stock à l'hectare sont celles du Nord-Est de la France (figure 3, p. 142) : Alsace (88 tC/ha), Lorraine (85 tC/ha) et Franche-Comté (83 tC/ha). À l'opposé, les régions de faible stock par unité de surface sont les régions méditerranéennes : Languedoc (38 tC/ha) et Provence (30 tC/ha). Si l'on tient compte des surfaces forestières dans chaque région, les plus forts stocks totaux se retrouvent en Aquitaine (98 MtC), Rhône-Alpes (80 MtC) et Lorraine (71 MtC), les plus faibles en Corse (9 MtC), dans le Nord-Pas-de-Calais (5 MtC) et en Basse-Normandie ⁽¹⁾ (10 MtC).

En moyenne sur la France, les peuplements à plus fort stock par unité de surface sont les sapinières (87 tC/ha) et les hêtraies (84 tC/ha), les plus faibles étant les peuplements de Douglas (45 tC/ha), du fait de leur âge le plus souvent peu élevé, et de feuillus ou résineux divers (42 tC/ha). Les stocks de carbone par unité de surface dans la biomasse des forêts domaniales (75 tC/ha) et soumises (71 tC/ha) sont nettement supérieurs à ceux des forêts privées (55 tC/ha), en partie en raison du plus jeune âge de ces dernières. L'ordre s'inverse lorsqu'on calcule des stocks totaux, en raison de la forte proportion de forêts privées (74 %).

En comparaison avec nos voisins européens (figure 4, p. 144), la France se situe, en terme de stock par unité de surface, entre les pays d'Europe continentale, à fort stock de carbone (Suisse : 234 tC/ha, Autriche : 93 tC/ha, Allemagne : 89 tC/ha), et les pays scandinaves ou méditerranéens, à faible taux de carbone (entre 20 et 40 tC/ha), reflétant bien la variété des territoires biogéographiques présents sur notre territoire.

Stock de carbone des sols

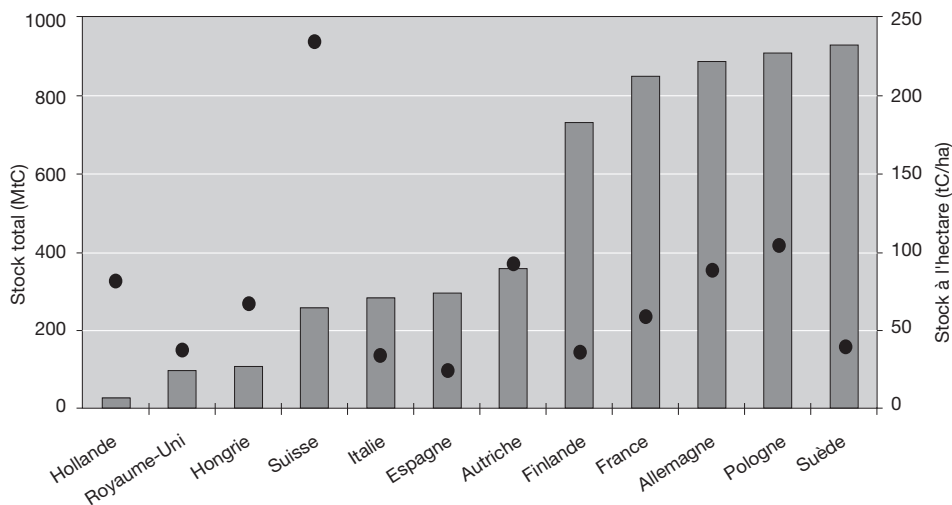
Nous nous sommes appuyés sur les analyses de sol des 540 placettes constituant la partie française du réseau systématique européen de suivi de l'état de santé des forêts. Les prélèvements ont été effectués en 1993-1994 sur un réseau systématique 16 km x 16 km couvrant l'ensemble de la forêt française. Les méthodes de prélèvement et d'analyses, classiques, sont décrites par Badeau (1998). La profondeur maximale et la vitesse à laquelle des changements du stock de carbone des sols peuvent intervenir sous l'effet de l'action humaine ne sont pas connues avec précision (voir cependant Arrouays *et al.*, 1999). Nous avons arbitrairement calculé le stock de 10 en 10 cm jusqu'à 30 cm de profondeur, en incluant la litière.

(1) Les haies ne sont pas inventoriées par l'IFN et n'entrent donc pas dans ce calcul.

Figure 4

**STOCKS TOTAUX (barres) ET À L'HECTARE (points) DE CARBONE
DANS LA BIOMASSE FORESTIÈRE DE QUELQUES PAYS EUROPÉENS**

D'après la synthèse de Nabuurs *et al.*, 1997 et les données de la présente étude pour la France



Le stock total des sols forestiers est de 1 140 MtC, soit 79 tC/ha. Cette valeur diffère fortement de celles retenues lors d'études antérieures [30 tC/ha selon DERF (1995) ; 175 tC/ha selon Bossy *et al.* (1994)]. La litière comprend 11 % de ce stock, la couche 0-10 cm en comprend 47 %, la couche 10-20 cm 28 % et la couche 20-30 cm 16 %. Il augmente encore significativement en étendant le calcul jusqu'à 40 cm de profondeur (92 tC/ha). Hors litière, nous obtenons donc un total de 71 tC/ha, très proche de la valeur calculée de façon relativement indépendante par Arrouays *et al.* (1999). En comparaison avec la biomasse, la variabilité des stocks de carbone des sols est plus difficile à modéliser en fonction de paramètres de l'environnement. Le principal facteur de variation est l'essence dominante de la station, en liaison avec le type d'humus. Le type pédogénétique du sol n'explique qu'une plus faible part de la variation totale.

Finalement, le stock de carbone des forêts françaises peut être partagé entre les compartiments sols et biomasse selon le diagramme de la figure 5 (ci-dessous).

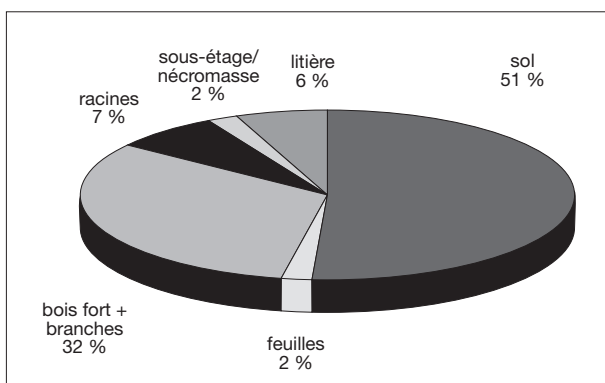


Figure 5
**RÉPARTITION DU CARBONE
DES FORÊTS FRANÇAISES
DANS LES DIFFÉRENTS COMPARTIMENTS
DE L'ÉCOSYSTÈME
(total de 137 tC/ha)**

COMMENT VARIE ACTUELLEMENT LE STOCK DE CARBONE DANS LES FORÊTS FRANÇAISES ?

Nous avons calculé les variations du stock de carbone dans les forêts françaises de deux façons indépendantes.

Comparaison d'inventaires successifs

L'inventaire des volumes forestiers étant depuis peu disponible sur l'ensemble de la France pour deux cycles successifs (dates moyennes 1979 et 1991), il est possible de quantifier l'évolution des stocks de carbone des forêts françaises, en appliquant successivement aux deux dates la méthode présentée précédemment.

On observe, au cours de ces 12 années, une augmentation de 27,5 millions de m³/an du volume bois fort sur pied des forêts de production (hors peupleraies). Ceci correspond à un accroissement annuel de 1,3 % du stock total de carbone dans la biomasse des forêts françaises, qui passe de 740 MtC en 1979 à 860 MtC en 1991. On en déduit que, durant la même période, la biomasse des forêts a constitué un puits de 10,5 MtC/an, soit près de 10 % de nos émissions annuelles brutes de carbone fossile [107 MtC en moyenne (Marland *et al.*, 1999)]. La surface forestière française s'est accrue de 14 millions à 14,5 millions d'hectares entre 1979 et 1991 (soit une progression de 0,3 % par an), contribuant ainsi à cet accroissement du stock total de carbone. La biomasse initiale des terrains abandonnés à la forêt est cependant faible. L'accroissement du stock de carbone provient principalement des terrains déjà forestiers, comme le suggère la forte augmentation du stock de carbone par unité de surface, qui passe de 53 tC/ha à 59 tC/ha (1,0 % d'augmentation annuelle).

Bilan des entrées et sorties dans la forêt

On peut aussi calculer la variation du stock de carbone dans les forêts françaises (STO) à partir de l'équation qui la relie à la production courante (PRO), aux prélèvements (quantité de bois exportée hors de la forêt, PRE) et à la mortalité (MOR) :

$$PRO = PRE + STO + MOR$$

La production et la mortalité sont mesurées par l'Inventaire forestier national à chacun de ses passages, en moyenne sur les cinq années précédant la date d'inventaire. Nous avons calculé le prélèvement à partir de l'enquête annuelle de branche des activités "exploitation forestière et scierie" du Ministère de l'Agriculture et des estimations, toujours par enquête, du bois de feu prélevé en forêt (CLIP, 1994). On en déduit l'accroissement du stock. Les différents termes de ce bilan sont donnés au tableau I (p. 146), exprimés en volume bois fort.

Nous obtenons une valeur de 27,7 millions de m³/an d'accroissement annuel moyen du stock de bois sur pied entre 1979 et 1991 dans les forêts de production (hors peupleraies). Le très faible écart avec le chiffre calculé précédemment est probablement en partie fortuit vu les incertitudes qui pèsent sur ces calculs, en particulier sur l'estimation de la quantité de bois de feu mobilisée en dehors des circuits commerciaux en France.

Le faible niveau actuel des prélèvements de bois dans la forêt française (61 % seulement de la production courante) entraîne donc une accumulation rapide de carbone dans la biomasse. Ce pourcentage global de prélèvement cache de fortes disparités entre régions ou espèces (Pignard, 1994). Dans les Landes par exemple, le prélèvement actuel représente environ 92 % de la production (Loustau *et al.*, 1999).

Tableau I

**Production en volume, variation du volume sur pied, mortalité
et prélèvements annuels moyens de bois fort dans les forêts françaises
(hors peupleraies et forêts de protection)**

	1979	1991
Production courante par unité de surface (m ³ /ha/an)	5,8	6,2
PRO: Production courante annuelle de 1979 à 1991 (millions de m ³ /an)	81,1	
MOR: Mortalité annuelle moyenne entre 1979 et 1991 (millions de m ³ /an)	4,0	
PRE: Prélèvement annuel entre 1979 et 1991 (millions de m ³ /an)	49,4	
dont: bois d'œuvre	18,5	
bois-énergie	17,0	
bois d'industrie et de trituration	10,8	
STO: Variation du volume sur pied entre 1979 et 1991 (millions de m ³ /an)	27,7	

Les raisons de cet écart entre production et prélèvements sont multiples et hors du sujet de cet article. Il est cependant intéressant de noter que, parallèlement à l'augmentation des stocks de bois sur pied, la production courante a fortement augmenté (1,1 % par an en moyenne, de 74,2 à 83,7 millions de m³/an). Cette augmentation est liée à deux phénomènes :

- l'accroissement de la surface forestière française ;
- une forte augmentation de la productivité par unité de surface, qui passe de 5,8 à 6,2 m³/ha/an (0,9 % par an).

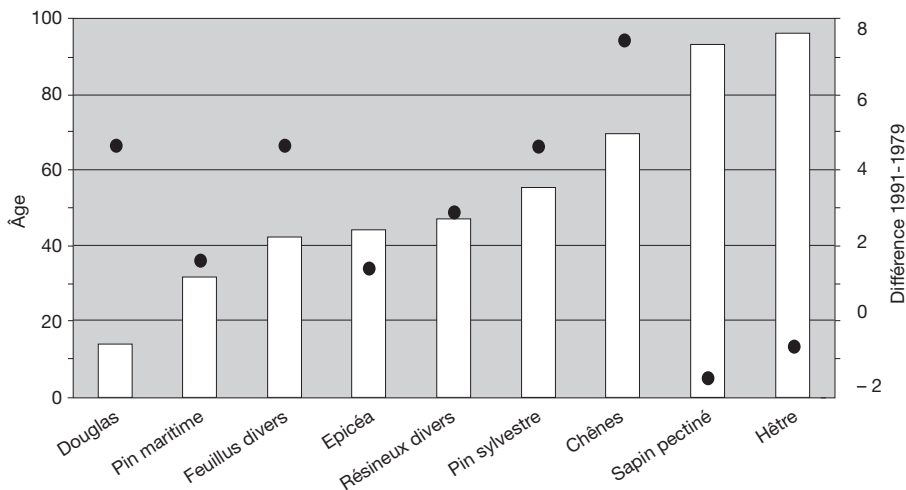
De nombreux résultats, à l'échelle de la France (Badeau *et al.*, 1996 ; Becker *et al.*, 1995) ou de l'Europe (Spiecker *et al.*, 1996), montrent que la productivité biologique en volume des peuplements a augmenté, à âge constant, au cours du dernier siècle. La quantification de ces changements de productivité est encore imprécise, et les augmentations observées varient de + 20 % à + 200 % en un siècle (soit 0,2 % à 1,1 % par an) selon les espèces, les régions d'Europe et les méthodes employées. Des résultats récents (Bergès *et al.*, 2000) indiquent que l'augmentation de l'accroissement en volume s'accompagne d'une stabilité de la densité du bois, et que, en conséquence, ces augmentations de productivité correspondent bien à des augmentations de productivité en biomasse.

Cette augmentation de productivité est due, dans certains cas particuliers bien connus, aux changements de matériel génétique et d'itinéraires techniques en forêt, comme par exemple en forêt landaise où la productivité moyenne du Pin maritime a augmenté de 125 % entre 1960 et 1988, principalement sous l'effet de l'amélioration du drainage et de la fertilisation phosphatée, secondairement sous l'effet du changement de la structure d'âge du peuplement (Loustau *et al.*, 1999).

Des évolutions dans les structures d'âges de la forêt française pourraient aussi expliquer une part des augmentations de productivité observées (rajeunissement des peuplements âgés ou vieillissement des jeunes peuplements). On constate globalement un vieillissement des futaies, qui passent en moyenne pondérée par les surfaces de 54 à 58 ans en 12 ans. Ce vieillissement est surtout manifeste dans les jeunes douglasaies, et dans les chênaies pourtant déjà relativement âgées, alors que sapinières et hêtraies rajeunissent (figure 6, p. 147). Ces moyennes cachent bien sûr de fortes disparités selon les classes d'âges et les régions. De plus, nous n'avons aucune information sur les évolutions des structures d'âge dans les peuplements inéquiennes, qui constituent pourtant près du tiers des surfaces forestières. Enfin, ces évolutions de l'âge moyen sont légèrement biaisées en raison de la conversion progressive d'anciens taillis-sous-futaie en futaie régulière.

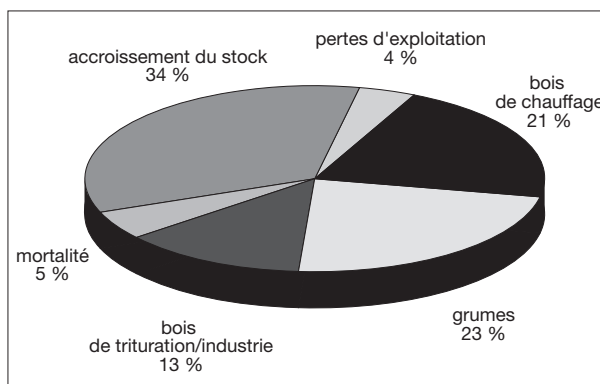
Figure 6

**ÂGE MOYEN PONDÉRÉ PAR LES SURFACES DES FUTAIES FRANÇAISES (barres)
ET VARIATION DE CET ÂGE ENTRE 1979 ET 1991 (points)**



Nos calculs permettent une ventilation de la production des forêts françaises en fonction de son devenir (figure 7, ci-dessous). La part de bois de feu est remarquablement élevée (21 % de la production courante). Les grumes, qui conduisent aux utilisations les plus durables du bois, ne représentent finalement que 37 % de la récolte de bois.

**Figure 7
DEVENIR DE LA PRODUCTION MOYENNE
EN VOLUME
DES FORÊTS FRANÇAISES
SUR LA PÉRIODE 1979-1991**



Concernant les flux de carbone liés aux sols, il n'existe pas d'inventaire représentatif ancien des sols forestiers français qui permettrait de quantifier les changements à long terme des stocks de carbone dans la matière organique du sol. Toutefois, une étude de rééchantillonnage menée à 20 ans d'intervalle sur 100 placettes représentatives des futaies de Hêtre adultes du Nord-Est de la France montre une stabilité du stock de carbone dans la couche 0-30 cm entre 1970 et 1990 (Thimonier, 1994).

QUELLES SONT LES STRATÉGIES ENVISAGEABLES POUR AUGMENTER LE STOCK DE CARBONE DANS LA BIOMASSE DES FORÊTS FRANÇAISES ?

Si l'on ne considère que l'aspect forestier, sans tenir compte du pool constitué par les produits exportés hors de la forêt, il y a deux possibilités pour augmenter le stock de carbone dans la biomasse des forêts françaises :

- l'augmentation des surfaces forestières ;
- l'augmentation du stock moyen de carbone par unité de surface.

L'augmentation des surfaces forestières

La surface forestière française s'est accrue de 43 000 ha/an en moyenne sur la période étudiée (de 14 à 14,5 millions d'hectares entre 1979 et 1991), et ce rythme devrait, dans le cadre de la politique agricole européenne actuelle, se maintenir. Bossy *et al.* (1994) estimaient à 2,4 MtC/an les effets de puits sur 50 ans d'une extension des forêts au rythme de 30 000 ha/an. Ce chiffre, à la lueur de nos résultats, doit être fortement révisé à la baisse (1,4 MtC/an) puisqu'il apparaît que le passage d'une prairie à une forêt n'entraîne aucune séquestration supplémentaire de carbone dans le sol (environ 70 tC/ha dans les deux cas), et que le boisement d'une terre arable ne devrait représenter, au mieux, qu'une augmentation du stock dans le sol de 20 tC/ha [voir Arrouays *et al.* (1999) pour les données concernant les sols non forestiers].

De plus, diverses forces s'opposent à une augmentation rapide de la surface forestière. La fermeture des paysages liée à l'augmentation des surfaces boisées est souvent mal vécue dans les régions de forte déprise (moyennes montagnes françaises, Vosges ou Massif central par exemple), qui comptent par ailleurs sur le tourisme pour se développer. Ces mêmes territoires sont en compétition avec d'autres utilisations : loisirs, protection de la nature, bâti et routes (40 000 ha/an supplémentaires au cours de la décennie étudiée, soit autant que les forêts, pour ces deux dernières catégories) ou, peut-être, dans un proche avenir, production agricole d'énergie ou de matériaux renouvelables.

L'augmentation du stock moyen de carbone par unité de surface

De forts potentiels d'augmentation des stocks moyens de carbone à l'hectare existent, lorsque l'on compare les stocks actuels aux maximums connus. Des valeurs de plus de 200 tC/ha dans la biomasse sont ainsi fréquemment dépassées dans les chênaies, chênaies-frênaies, hêtraies, sapinières, pessières ou douglasaies matures d'Europe. Dans les peuplements naturels mélangés de Sapin, Épicéa et Hêtre des Alpes ou des montagnes d'Europe continentale, des valeurs extrêmes proches de 400 tC/ha dans la biomasse sont observées.

La fertilisation, le choix d'essence à croissance rapide, le raccourcissement de la durée de la phase de régénération permettent d'accélérer le stockage de bois et donc de créer des puits temporaires de carbone. Dewar et Cannell (1992) ont ainsi calculé qu'une plantation de Peuplier coupée tous les 26 ans représentait un stock moyen, sur le long terme, de 212 tC/ha contre 154 tC/ha pour une chênaie coupée tous les 95 ans. L'âge d'exploitabilité très bas dans les peupleraies serait en effet compensé par la vitesse rapide d'accumulation de bois et les fortes valeurs de stock de bois obtenues en fin de révolution.

Ces choix ont cependant des conséquences écologiques, économiques ou sociales qui les rendent là encore difficilement applicables à grande échelle sur le territoire français.

La plantation d'un sous-étage, et plus généralement l'installation de peuplements multi-étagés, en particulier sous les espèces de lumière (Pin sylvestre, Chêne pédonculé), ou dans les peuplements ayant subi des ouvertures (dépérissements par exemple) pourraient accroître le stock sur pied.

Adaptation et conséquences pour la gestion

Ainsi, en forêt de Haguenau, une large part de la forte augmentation des volumes sur pied observée (+ 63 % en 150 ans) est imputable à la généralisation de la plantation d'un sous-étage de Hêtre dans les pineraies au cours du siècle écoulé. Cette pratique a de plus l'avantage d'améliorer la qualité des bois produits (rectitude et élagage naturel accrus), mais son coût est relativement élevé et il est peu probable qu'elle puisse être appliquée à grande échelle (Burschel *et al.*, 1993).

Les éclaircies quant à elles jouent deux rôles antagonistes sur les flux de carbone. D'une part, elles peuvent améliorer la qualité des produits, et donc dans certains cas leur potentiel d'utilisation dans des produits à durée de vie plus longue. Par contre, sans abaisser outre mesure le rendement de la forêt, elles abaissent fortement le stock de bois sur pied. En conséquence, la transition d'un régime d'éclaircies modérées à un régime d'éclaircies fortes s'accompagne d'une baisse notable du volume moyen de carbone stocké sur une surface donnée. Dans des hêtraies ou chênaies fertiles, on observe ainsi une baisse de plus de 20 % du stock moyen de bois sur pied, pour une baisse très faible de la production totale (tableau II, ci-dessous).

Tableau II **Impact de la durée de la révolution et de l'intensité des éclaircies sur le stock moyen de bois sur pied (premier chiffre, en m³/ha) et la production totale (second chiffre, en m³/ha) dans des hêtraies et chênaies françaises de bonne fertilité (simulations d'itinéraires techniques basées sur des données de placettes permanentes) (Dhôte, 1996)**

	Durée de la révolution	Éclaircies	
		modérées	fortes
Hêtre	140 ans	402/1351	321/1330
	100 ans	266/910	208/884
Chêne sessile	200 ans	379/1714	289/1582
	140 ans	249/1082	197/1009

L'âge d'exploitabilité est le facteur ayant l'effet le plus net sur les stocks de bois sur pied. Lorsqu'un peuplement est coupé à un âge proche de son accroissement moyen annuel maximal, on montre que le stock moyen de carbone de ce peuplement sur la durée du cycle sylvicole ne représente qu'à peine un tiers du stock maximal que le même peuplement aurait pu atteindre à maturité (Cooper, 1982). Dans des hêtraies fertiles par exemple, on accroît le stock de bois sur pied de plus de 50 % en allongeant de 100 à 140 ans la durée de révolution (tableau II, ci-dessus). Augmenter les âges d'exploitabilité est ainsi le moyen le plus rapide pour accroître la fonction de puits de carbone des forêts européennes (Burschel *et al.*, 1993), mais pose des problèmes économiques évidents.

Le vieillissement des peuplements peut entraîner, à long terme, des risques sanitaires accrus. Cependant, il est probable, au vu des stocks très élevés observés dans les réserves intégrales ou les vieilles futaies européennes, que nous sommes encore nettement en dessous de cette valeur seuil dans les forêts françaises, où le stock moyen est de 147 m³ bois fort/ha. On mesure jusqu'à 934 m³/ha bois fort dans une forêt naturelle mélangée des Carpathes, 600 m³/ha en moyenne dans les futaies irrégulières d'Épicéa, Sapin et Hêtre mélangés des Alpes bavaroises (Assmann, 1970) ou dans les vieilles futaies de nos voisins suisses (Brassel et Brändli, 1999).

Aboutissement final de l'allongement de la révolution, la mise en réserve intégrale permet d'atteindre des valeurs très élevées de stock de carbone pour un coût de gestion faible. Les compartiments matière organique du sol, litière et bois mort y prennent une importance considérable. Ces réserves ne peuvent cependant, pour des raisons économiques, représenter aujourd'hui une part

importante de nos forêts. D'autre part, elles sont plus sensibles aux perturbations physiques (sécheresses, incendies, chablis) et biotiques (attaques de pathogènes) qui constituent leur mode de régénération normal, que les forêts gérées. Sur de petites surfaces forestières comme celle de la France, une proportion importante de réserves intégrales entraînerait une plus forte variabilité temporelle des stocks et flux de carbone, puisque de larges parts de forêts pourraient brutalement dépérir. Ce mécanisme est par exemple responsable du passage des 303 millions d'hectares de forêts boréales canadiennes d'un rôle de puits à un rôle de source de carbone suite à l'augmentation de l'intensité des perturbations au cours des années 1970-1989 (Price *et al.*, 1998).

La dynamique de la matière organique des sols forestiers est encore relativement mal connue. On ne connaît que très mal par exemple jusqu'à quelle profondeur et avec quelle intensité est affecté le carbone des sols lors du vieillissement des peuplements, sous l'effet des opérations sylvicoles ou des perturbations naturelles. L'accroissement de ce stock, pour sa partie la plus superficielle du moins, peut se faire en limitant les pertes par décomposition dans l'humus ou en augmentant le flux d'entrée de litière et de bois mort. Les incendies, les coupes rases ou le travail du sol préalable aux régénérations diminuent le stock de carbone dans les couches humiques, pour des périodes pouvant atteindre plusieurs dizaines d'années. Le contrôle de ces perturbations fournit donc une opportunité supplémentaire de stockage de carbone. L'accroissement de l'épaisseur des humus est cependant un facteur défavorable à l'installation des jeunes plants lors des régénérations. De plus, il s'accompagne généralement d'une baisse de la diversité des communautés végétales et animales et favorise l'acidification des sols.

Le bois mort met jusqu'à plusieurs dizaines d'années à se décomposer en forêt, en particulier en climat froid ou sec. On peut donc accroître la fonction puits de carbone des forêts en augmentant la quantité de bois laissé sur place (rémanents) lors de la récolte. Ranger et Nys (1996) ont montré par exemple que le prélèvement de la totalité de la biomasse d'un taillis augmentait de 55 à 70 % la biomasse prélevée par rapport à un prélèvement limité à la découpe 7 cm. La proportion volumique actuelle de bois mort dans les forêts françaises est estimée par l'IFN à 1,1 % du bois fort vivant, en ne tenant compte ni du bois mort depuis plus de 5 ans, ni des bois à terre. En Suisse, elle est en moyenne de 3 % (Brassel et Brändli, 1999). On sait par ailleurs que ce taux peut atteindre de 5 % à 25 % dans les forêts naturelles. Le choix d'une telle option implique là encore certains risques sanitaires qu'il conviendrait d'étudier au préalable.

RELATIONS ENTRE FLUX DE CARBONE, CHOIX SYLVICOLES ET UTILISATION DES PRODUITS FORESTIERS

Dans le cadre d'une optimisation du stock de carbone non atmosphérique, les choix sylvicoles doivent aussi être raisonnés en tenant compte du pool total forêt-bois mis en œuvre. En effet, on comprend intuitivement que pour les bois prélevés en forêt et utilisés pour fabriquer des produits de courte durée de vie, comme le papier par exemple, on créera un puits de carbone en augmentant l'âge d'exploitabilité de ces peuplements, c'est-à-dire en ralentissant le flux de sortie de ces produits hors de la forêt. De même, le puits de carbone sera augmenté si les bois utilisés pour fabriquer des produits à longue durée de vie, comme les charpentes par exemple, sont exploités, à l'inverse du cas précédent, avec un rendement maximal.

De façon plus précise, des modèles simples ont été élaborés pour simuler les effets relatifs de ces différents paramètres sur le stock global de carbone forêt et bois hors forêt. Cannell *et al.* (1992) montrent que l'âge d'exploitabilité optimal, en terme de carbone total fixé, dépend de façon critique du produit suivant :

$$\alpha = fc \times tmp / tma$$

où f_c est la fraction de carbone stockée dans la biomasse de la forêt mature par rapport au total biomasse, nécromasse et sol de cette même forêt, t_{mp} le temps moyen de résidence du carbone dans les produits issus de la forêt et t_{ma} l'âge auquel est atteint le maximum de l'accroissement moyen annuel.

Lorsque α est inférieur à 0,7, c'est-à-dire lorsque la durée de vie des produits bois ou la fraction de carbone stockée dans la biomasse sont faibles, la stratégie qui maximise le stockage de carbone consiste à ne pas couper la forêt. Par contre, si α dépasse 0,7, il devient possible, pour certaines durées de révolution, de stocker plus de carbone dans le système forêt-bois mis en œuvre que dans la seule forêt mature. Lorsque α augmente, l'âge d'exploitabilité optimal se rapproche alors rapidement de l'âge d'accroissement moyen annuel maximal. L'évaluation précise des paramètres précédents pour nos différents systèmes sylvicoles reste à faire, mais les premières estimations de durée de vie des produits du bois en France indiquent des valeurs très faibles (18 ans en moyenne hors papier et carton selon Lochu, 1998) et suggèrent donc que, dans la plupart des cas, la meilleure stratégie consiste probablement à allonger la durée de la révolution.

CONCLUSIONS

Notre calcul d'un stock de 2 000 MtC dans les sols et la biomasse des forêts françaises pour l'année 1991 constitue une amélioration des estimations précédentes. Ce chiffre est probablement encore sous-estimé, en raison des valeurs prudentes que nous avons choisies pour la plupart des paramètres, tels les facteurs d'expansion ou la biomasse du sous-étage. Une première estimation, non présentée ici, du stock total de carbone dans la biomasse du territoire français, toutes utilisations du sol confondues, montre que les forêts constituent entre 85 % et 90 % du pool global de carbone dans la biomasse.

L'accroissement des stocks de carbone dans la forêt ne peut apporter qu'une contribution temporaire et limitée à la réduction de notre bilan net d'émission de carbone fossile. La simple constatation que le stock total de carbone dans la biomasse des forêts françaises (860 MtC) ne représente que 8 années de nos émissions annuelles brutes de carbone fossile (107 MtC/an) montre clairement les limites auxquelles se heurterait rapidement une solution basée sur le seul stockage en forêt. Autrement exprimé, il faudrait reboiser plus de 2 millions d'hectares par an pour compenser la totalité de nos émissions de carbone fossile...

Toutefois, l'accroissement des stocks de carbone de la forêt française reste possible dans certaines limites et pourrait représenter un pourcentage significatif de nos émissions, sachant qu'il en représente déjà 10 %. Au seul niveau forestier, les options les plus efficaces en termes de vitesse et quantité de carbone stocké sont souvent les moins productives (augmentation de l'âge d'exploitabilité, diminution des prélèvements de bois). Ce sont d'ailleurs probablement ces mécanismes qui sont à l'œuvre aujourd'hui, et qui expliquent une large part du puits de carbone des forêts françaises.

Le remplacement de l'utilisation des énergies fossiles ou des matériaux à haut coût énergétique par des énergies ou des matériaux renouvelables (bois-énergie et bois d'œuvre) est une option permettant une amélioration réelle de notre bilan net de carbone à long terme, dans laquelle la forêt serait amenée à jouer un rôle primordial, impliquant une productivité accrue. Cependant, l'effet de ces remplacements reste là encore faible devant l'ampleur des émissions de carbone fossile.

Les décisions sylvicoles liées aux différentes options de stockage présentées précédemment ne peuvent donc être raisonnées indépendamment du devenir des produits exportés hors de la forêt. La quantification de la durée de vie de ces produits, du pool de carbone total qu'ils représentent, de son évolution et des économies de carbone fossile qu'ils permettent est nécessaire afin d'éta-

blir un bilan global du carbone pour chacune de ces options. Ces bilans carbonés doivent s'accompagner, en parallèle, de bilans écologiques (impact sur la fertilité et la biodiversité) et économiques. Les données nécessaires à l'établissement de ces bilans sont encore manquantes ou très dispersées.

Jean-Luc DUPOUEY – Vincent BADEAU
Anne THIMONIER
Équipe Phytoécologie forestière
Unité Écophysiologie forestière
INRA Centre de Nancy
F-54280 CHAMPENOUX

Gérôme PIGNARD
Cellule d'Évaluation de la Ressource
INVENTAIRE FORESTIER NATIONAL
BP 1
Maurin
F-34970 LATTES

Jean-François DHÔTE
Dynamique des Systèmes forestiers
ENGREF
14, rue Girardet
F-54042 NANCY CEDEX

Gérard NEPVEU
Laboratoire de Qualité des Bois
INRA Centre de Nancy
F-54280 CHAMPENOUX

Laurent BERGÈS
CEMAGREF
Domaine des Barres
F-45290 NOGENT-SUR-VERNISSON

Laurent AUGUSTO – Saïd BELKACEM
Claude NYS
Équipe Cycles biogéochimiques
INRA Centre de Nancy
F-54280 CHAMPENOUX

BIBLIOGRAPHIE

- ARROUAYS (D.), DESLAIS (W.), DAROUSSIN (J.), BALESDENT (J.), GAILLARD (J.), DUPOUEY (J.-L.), NYS (C.), BADEAU (V.), BELKACEM (S.). — Stocks de carbone dans les sols de France : quelles estimations ? — *Comptes-rendus de l'Académie d'Agriculture de France*, vol. 85, n° 6, 1999, pp. 278-292.
- ASSMANN (E.). — The principles of forest yield study. — Oxford : Pergamon Press, 1970. — 506 p.
- AUCLAIR (D.), BIGE (M.-C.). — Une méthode d'évaluation régionale de la biomasse des taillis à partir des données de l'Inventaire forestier national. Application à la région Centre. — *Annales des Sciences forestières*, vol. 41, n° 4, 1984, pp. 405-426.
- BADEAU (V.), BECKER (M.), BERT (D.), DUPOUEY (J.-L.), LEBOURGEOIS (F.), PICARD (J.-F.). — Long-term growth trends of trees : ten years of dendrochronological studies in France. *In* : Growth trends in European forests / H. Spiecker, K. Mielikäinen, M. Köhl, J.-P. Skovsgaard Eds. — Berlin : Springer Verlag, 1996. — pp. 167-181.
- BADEAU (V.). — Caractérisation des placettes françaises du Réseau européen : analyse et interprétation des données écologiques. — *Les Cahiers du DSF*, n° 5, 1998, 212 p. + annexes.

- BECKER (M.), BERT (G.D.), BOUCHON (J.), DUPOUEY (J.-L.), PICARD (J.-F.), ULRICH (E.). — Long-term changes in forest productivity in northeastern France : the dendroecological approach. *In* : Forest decline and atmospheric deposition effects in the French mountains / G. Landmann, M. Bonneau Eds. — Berlin : Springer Verlag, 1995. — pp. 143-156.
- BERGÈS (L.), DUPOUEY (J.-L.), FRANC (A.). — Long-term changes in wood density and radial growth of *Quercus petraea* Liebl. in northern France since the middle of the nineteenth century. — *Trees - Structure and Function*, vol. 14, n° 7, 2000, pp. 398-408.
- BOSSY (A.), BOUHOT (L.), BARTHOD (C.), DELDUC (P.), PELISSIÉ (D.). — La Forêt française et l'accroissement de l'effet de serre. — *Revue forestière française*, vol. XLVI, n° 3, 1994, pp. 201-221.
- BOUCHON (J.), OTTORINI (J.-M.), PARDÉ (J.). — Contribution à une meilleure connaissance des potentialités ligneuses totales en France à partir des données de l'Inventaire forestier national. — Rapport CEE 470.78.7.ESF. — Champenoux : INRA-Nancy, 1981. — 18 p. + annexes (Document interne).
- BRASSEL (P.), BRÄNDLI (U.B.). — Inventaire forestier national suisse - Résultats du deuxième inventaire 1993-1995. — Berne : P. Haupt, 1999. — 442 p. + cartes.
- BURSCHEL (P.), KÜRSTEN (E.), LARSON (B.C.). — Die Rolle von Wald und Forstwirtschaft im Kohlenstoffhaushalt. Eine Betrachtung für die Bundesrepublik Deutschland. — *Forstliche Forschungsberichte München*, n° 126, 1993, 135 p.
- CANNELL (M.G.R.). — World forest biomass and primary production data. — Londres : Academic Press, 1982. — 391 p.
- CANNELL (M.G.R.), DEWAR (R.C.), THORNLEY (J.H.M.). — Carbon flow and storage in European forests. *In* : Responses of forest ecosystems to environmental changes / A. Teller, J.N.R. Jeffers Eds. — London : Elsevier, 1992. — pp. 256-271.
- CLUB D'INGÉNIERIE PROSPECTIVE ÉNERGIE ET ENVIRONNEMENT (CLIP). — La Ressource en bois-énergie. *In* : Le bois-énergie en France. — *Les Cahiers du CLIP*, n° 3, 1994, pp. 11-22.
- COOPER (C.F.). — Carbon storage in managed forests. — *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 13, 1982, pp. 155-166.
- DERF. — Les Indicateurs de gestion durable des forêts françaises. — Paris : Ministère de l'Agriculture - Direction de l'Espace rural et de la Forêt, 1995. — 49 p.
- DEWAR (R.C.), CANNELL (M.G.R.). — Carbon sequestration in the trees, products and soils of forest plantations : an analysis using UK examples. — *Tree Physiology*, 11, 1992, pp. 49-71.
- DHÔTE (J.-F.). — A model of even-aged beech stands productivity with process-based interpretations. — *Annales des Sciences forestières*, vol. 53, 1996, pp. 1-20.
- KOHLMAIER (G.H.), WEBER (M.), HOUGHTON (R.A.). — Carbon dioxide mitigation in forestry and wood industry. — Berlin : Springer Verlag, 1998. — 375 p.
- LOCHU (S.). — Évaluation des quantités de carbone stocké. — Mission interministérielle de l'Effet de Serre, 1998. — 94 p.
- LOUSTAU (D.), BERT (D.), TRICHET (J.). — Fonctionnement primaire et productivité de la forêt landaise : implications pour une gestion durable. — *Revue forestière française*, vol. LI, n° 5, 1999, pp. 571-591.
- MARLAND (G.), ANDRES (R.J.), BODEN (T.A.), JOHNSTON (C.), BRENKERT (A.). — Global, regional, and national CO₂ emission estimates from fossil fuel burning, cement production, and gas flaring : 1751-1996. — Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge, Numeric data package (NDP-030), 1999. (<http://cdiac.esd.ornl.gov/ndps/ndp030.html>).
- NABUURS (G.J.), PÄIVINEN (R.), SIKKEMA (R.), MOHREN (G.M.J.). — The role of European forests in the global carbon cycle - a review. — *Biomass and Bioenergy*, vol. 13, n° 6, 1997, pp. 345-358.
- PIGNARD (G.). — Estimation des prélèvements de bois dans la forêt française. Approche forestière de l'auto-consommation. — IFN-ADEMA, 1994. — 92 p.
- PIGNARD (G.). — Évolution récente de la forêt française : surface, volume sur pied, productivité. — *Revue forestière française*, vol. LII, n° spécial "Conséquences des changements climatiques pour la forêt et la sylviculture", 2000, pp. 27-36.
- PRICE (D.T.), APPS (J.A.), KURZ (W.A.). — Past and possible future carbon dynamics of Canada's boreal forest ecosystems. *In* : Carbon dioxide mitigation in forestry and wood industry / G.H. Kohlmaier, M. Weber, R.A. Houghton Eds. — Berlin : Springer Verlag, 1998. — pp. 63-88.
- RANGER (J.), NYS (C.). — Biomass and nutrient content of extensively and intensively managed coppice stands. — *Forestry*, vol. 69, n° 2, 1996, pp. 91-110.
- ROGNER (H.H.). — An assessment of world hydrocarbon resources. — *Annual review of Energy and Environment*, n° 22, 1997, pp. 217-262.
- SCEES (Service central des Enquêtes et Études statistiques). — Statistique agricole annuelle - Résultats 1991. — Éditions Agreste, 1992. — 154 p.
- SCEES (Service central des Enquêtes et Études statistiques). — La Forêt et les industries du bois. — Éditions Agreste, 1997. — 150 p.

- SPIECKER (H.), MIELIKÄINEN (K.), KÖHL (M.), SKOVSGAARD (J.P.) Eds. — Growth trends in European forests. — Berlin : Springer Verlag, 1996. — 372 p.
- THIMONIER (A.). — Changements de la végétation et des sols en forêt tempérée européenne au cours de la période 1970-1990 : rôle possible des apports atmosphériques. — Université de Paris XI, 1994. — 178 p. + annexes (Thèse).
- VOGT (K.A.), VOGT (D.J.), PALMIOTTO (P.A.), BOON (P.), O'HARA (J.), ASBJORNSEN (H.). — Review of root dynamics in forest ecosystems grouped by climate, climatic forest type and species. — *Plant and Soil*, 187, 1996, pp. 159-219.

STOCKS ET FLUX DE CARBONE DANS LES FORÊTS FRANÇAISES (Résumé)

De par la masse importante de carbone qu'elles contiennent (81 % du carbone de la biomasse terrestre) et en raison de la lenteur des cycles forestiers, les forêts pourraient contribuer à limiter l'effet de serre, en immobilisant à moyen ou long terme une part du carbone émis lors de l'utilisation de sources d'énergies fossiles. Le stock de carbone dans la biomasse des forêts françaises est évalué à 860 MtC pour 14,5 millions d'hectares de forêt, celui des sols à 1 140 MtC. Le stock total des forêts françaises est donc de 2 000 MtC. Le stockage net a été dans les forêts françaises de 10,5 MtC/an entre 1979 et 1991, soit 10 % de nos émissions annuelles de carbone fossile. Ce puits est lié à l'accroissement de la surface forestière, de la productivité des peuplements, au vieillissement de la forêt française alors que les niveaux de prélèvements de bois restent très modérés (61 % de la croissance). Nous discutons enfin les options forestières permettant d'accroître cette fonction puits de la forêt : augmentation des surfaces forestières, utilisation d'essences à croissance rapide, vieillissement des peuplements, diminution du niveau des éclaircies et du travail du sol, mise en réserve intégrale...

CARBON STOCKS AND FLUX IN FRENCH FORESTS (Abstract)

Forests contain most of the carbon stored in the earth's biomass (81 %) and could play a role in CO₂ mitigation to a certain extent. We estimate French forest carbon stocks in biomass to be 860 MtC on 14.5 million hectares of forests, and 1,140 MtC in forest soils. Total carbon in the 14.5 million hectares of French forests is estimated at 2,000 MtC. Average annual flux for the 1979/91 period is 10.5 MtC/y, i.e. 10 % of national fossil fuel emissions. The main causes of this net carbon uptake are the rapid increase of forest area, increasing productivity due to environmental changes, ageing or, in some localized areas, more intensive silvicultural practices. These carbon sinks are not offset by the harvesting level which remains low on average (61 % of the annual volume growth). Forestry carbon mitigation options applicable in France are discussed. The need for global economic and ecological budgets (including carbon stocks, soil fertility and biodiversity) of the possible alternatives is stressed.
