

QUELQUES PROBLÈMES POSÉS PAR L'ÉVALUATION DES STOCKS ET FLUX DE CARBONE FORESTIERS AU NIVEAU NATIONAL

JEAN-LUC DUPOUEY - GÉRÔME PIGNARD

Les calculs de stocks et, surtout, de flux de carbone sont devenus en quelques années un enjeu majeur de la politique environnementale internationale, dans l'optique d'une réduction des émissions de gaz à effet de serre. La forêt joue un rôle central dans cette comptabilité, puisqu'elle contient, dans nombre de pays, la majeure partie du stock de carbone et qu'elle peut jouer un rôle non négligeable dans la limitation des émissions nettes de carbone.

Nous avons mis au point une méthodologie de calcul de ces stocks et flux nationaux, basée, pour la biomasse, sur les données de l'Inventaire forestier national (IFN) et, pour les sols, sur la partie française du Réseau européen de suivi des dommages forestiers et sur le réseau RENECOFOR (Dupouey *et al.*, 1999 ; Arrouays *et al.*, 1999 ; Pignard *et al.*, 2000). Les premiers résultats indiquent un stock total forestier de 2 000 MtC (millions de tonnes de carbone), 43 % de celui-ci dans la biomasse (tiges, racines et feuilles) et 57 % dans la litière et les sols (jusqu'à 30 cm de profondeur). La biomasse forestière a fixé environ 10,5 MtC par an pendant la période 1980-1990, en raison de l'accroissement des surfaces forestières et, surtout, en raison d'une augmentation rapide du stock de bois sur pied par unité de surface. Cette augmentation est liée au fait que les prélèvements actuels sont nettement inférieurs à la productivité (à peine plus de 60 % des 81 Mm³/an produits ; Ministère de l'Agriculture et de la Pêche, 2000). Cette fixation nette de carbone représente 10 % de nos émissions brutes de carbone fossile (100 MtC environ). La biomasse forestière joue donc actuellement un rôle positif significatif dans la limitation de nos émissions nettes de carbone.

Ces calculs de stocks et de flux sont cependant encore entachés de fortes incertitudes, en raison de multiples problèmes méthodologiques dont nous présentons une courte synthèse ici.

CALCUL DES STOCKS DE CARBONE

Stocks dans la biomasse

Nous rappelons que le calcul des stocks dans la biomasse est fait par sommation, pour l'ensemble des espèces et placettes échantillonnées par l'IFN, du produit suivant :

$$C = VIFN \times DEN \times FEB \times FER \times CAR$$

où C est la masse de carbone pour l'espèce et la placette considérées, VIFN son volume bois fort mesuré par inventaire, DEN la densité du bois, FEB le facteur d'expansion branches (rapport de la masse ou du volume ligneux aérien total à la masse ou au volume 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.

Si les estimations de volume de bois fort faites par l'IFN sont d'une très bonne précision, leur intégration à l'échelle nationale pour l'estimation des stocks de carbone pose quelques problèmes liés à la nature de l'échantillon.

D'une part, les ligneux trop petits (d'un diamètre inférieur à 7,5 cm) ne sont pas inventoriés. On laisse ainsi de côté tous les jeunes peuplements : régénérations en forêt, reboisements artificiels ou spontanés sur d'anciennes terres non forestières. Cantiani (1974) mesure pourtant 51 t/ha de matière sèche aérienne pour des sapins de diamètre inférieur à 7,5 cm dans une jeune sapinière (15 ans) des Apennins, à comparer au stock moyen de l'ensemble des forêts françaises de 89 t/ha de matière sèche aérienne. Si cette valeur est probablement parmi les plus élevées rencontrées dans de tels peuplements, elle montre qu'on ne pourra pas faire l'impasse sur tous les jeunes peuplements forestiers, non inventoriés aujourd'hui. Le protocole de Kyoto prendra principalement en compte, comme crédit d'émission apporté par la forêt dans les bilans de carbone nationaux, le carbone stocké entre 2008 et 2012 dans les reboisements intervenus depuis 1990 sur des terrains précédemment non boisés. Ces peuplements, appartenant à ce qu'on nomme déjà les "terres de Kyoto", n'auront donc que 1 à 22 ans lorsqu'il faudra calculer leur rôle exact dans les flux de carbone.

Ce problème prend un relief tout particulier en zone méditerranéenne et, de façon moins aiguë, en zone atlantique où les formations de type lande, maquis et garrigues, à diamètre moyen faible, occupent de grandes surfaces. Là encore, des valeurs de matière sèche aérienne supérieures à 50 t/ha ont été observées.

De plus, la mesure du volume de certaines catégories de ligneux hors forêt (arbres épars et d'alignement, haies) n'est plus systématiquement prévue par l'IFN aujourd'hui. Dans certains départements de l'Ouest de la France (Manche, Vendée, Mayenne...), ils représentaient pourtant plus de 40 % du volume ligneux total. Les parcs et jardins, les vergers et les vignes n'ont été l'objet d'aucune évaluation.

D'autre part, les données brutes de volume fournies par l'Inventaire forestier ne sont pas actualisées. Sur la base d'un échantillon de 8 à 10 départements par an, il faut 10 à 12 ans pour effectuer un cycle complet d'inventaire national. Ainsi, les stocks et les flux calculés en 1999 (Dupouey *et al.*, 1999) correspondent en fait à une moyenne sur la période 1982-1998, centrée autour de 1991. Il sera prochainement nécessaire de mettre en place des techniques d'actualisation annuelle de ces estimations. La France s'est par exemple engagée, dans le cadre du protocole de Kyoto, à stabiliser ses émissions de gaz à effet de serre entre 2008 et 2012 à leur niveau de 1990. Si le rôle de la forêt est pris en compte dans le calcul des émissions nettes de carbone de chaque pays, ce qui devrait en partie être le cas, il sera nécessaire de fournir des chiffres fiables au niveau national pour ces années ou ces périodes, plus courtes que notre cycle actuel d'inventaire.

Les coefficients multiplicateurs utilisés pour passer du volume bois fort de la tige à la carbomasse totale de l'arbre posent tous de difficiles problèmes d'estimation. Les facteurs d'expansion "branches" et, surtout, "racines" sont basés sur des mesures qui, si elles sont déjà nombreuses aujourd'hui, ne permettent pas encore d'établir de lois générales permettant de prendre en compte de façon fiable l'espèce, le type de sylviculture ou de station, pour ne parler que des facteurs les plus susceptibles de faire varier ces rapports. Ainsi, le tableau I (p. 296) montre qu'il n'y a pas concordance, selon les études, sur les valeurs à attribuer aux conifères et aux feuillus pour le facteur d'expansion "racines". On remarquera par contre que les valeurs moyennes obtenues toutes essences confondues sont très proches (23 % de racines dans la masse totale de l'arbre).

TABLEAU I Valeurs du facteur d'expansion "racines" d'après deux synthèses bibliographiques indépendantes.

On a sélectionné dans ces deux études tous les peuplements de forêts tempérées, boréales et méditerranéennes. Les chiffres entre parenthèses indiquent le nombre de peuplements utilisés pour ces estimations.

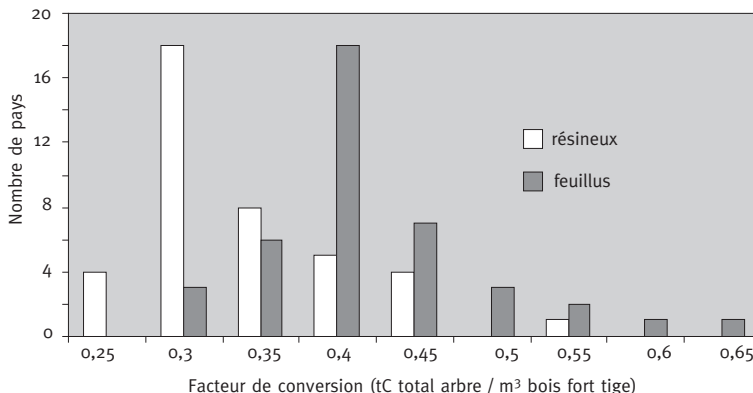
	Conifères	Feuillus	Total
Cannell (1982)	1,32 (91)	1,25 (54)	1,29 (145)
Vogt <i>et al.</i> (1996)	1,26 (68)	1,35 (26)	1,28 (94)
Total	1,29 (159)	1,28 (80)	1,29 (239)

Notre estimation des stocks de carbone des forêts françaises utilise une valeur moyenne de densité du bois par espèce, issue d'une analyse bibliographique. Mais il pourrait s'avérer utile de faire varier cette estimation selon le compartiment de l'arbre (branches, tronc — aubier et duramen —, écorce, racines) et selon son âge (ou du moins son diamètre). Les données nécessaires manquent actuellement pour la majorité des espèces ligneuses, à quelques rares exceptions près (Chêne sessile, Épicéa, Douglas, Pin laricio). Pour le Chêne sessile par exemple, essence bien étudiée, la densité du bois intégrée sur l'ensemble de la vie de l'arbre et mesurée à 1,30 m peut varier entre 600 et 850 kg/m³ selon les individus. L'âge à lui seul permet d'expliquer près de 20 % de cette variance entre arbres (Bergès, 1999).

De même, les causes de variation du taux de carbone dans la biomasse sont mal connues. La plupart des estimations utilisent une valeur moyenne de 45, 47,5 ou 50 % (Matthews, 1993), ce qui peut entraîner 10 % de différence sur le résultat final ! Mais des valeurs plus éloignées encore, entre 40 et 55 %, sont souvent mesurées. Des recherches supplémentaires sont nécessaires afin de mieux estimer ce paramètre.

Au total, le coefficient moyen, pour l'ensemble des forêts françaises, permettant de passer du volume de bois fort IFN en m³ à la quantité totale de carbone stockée dans l'arbre en tonnes de carbone est de 0,37 tC/m³ (0,29 tC/m³ pour les résineux et 0,43 tC/m³ pour les feuillus). Ces valeurs sont identiques aux valeurs modales utilisées dans les différents pays ayant effectué les mêmes calculs (figure 1).

FIGURE 1 VARIABILITÉ DU FACTEUR GLOBAL DE CONVERSION ENTRE VOLUME DE BOIS FORT TIGE ET CARBOMASSE TOTALE DE L'ARBRE DANS 41 PAYS DES ZONES TEMPÉRÉES ET BORÉALES (UN-ECE ET FAO, 2000)



Quelques autres compartiments, à l'échelle de la placette d'inventaire, sont encore mal connus. Si les valeurs moyennes de matière sèche de feuilles sont relativement bien connues pour quelques espèces à feuillage caduc (3 à 4 t/ha environ), grâce à des récoltes et pesées de chutes de feuilles en fin de saison, ce paramètre est plus difficile à estimer pour les espèces à feuillage persistant (une dizaine de t/ha). Les variations de cette biomasse foliaire par espèce, selon l'âge ou la station, restent à étudier. La situation est encore moins bien connue pour la biomasse du sous-bois, composé de petits ligneux, d'herbacées ou de mousses. En forêt claire et sur sol humide (peupleraie ou pineraie landaise par exemple), on observe des matières sèches épigées supérieures à 20 t/ha dans la strate herbacée. Il faudrait, à partir des typologies de stations existantes, établir des modèles simples de variation de ces biomasses herbacées. Notons que les deux compartiments précédents (feuilles et sous-bois) montrent de fortes variations de biomasse selon les saisons. Or, les stocks publiés sont rarement rapportés à une date précise. Nos calculs (Dupouey *et al.*, 1999) correspondent à un stock maximal de milieu de saison de végétation. Enfin, le bois mort n'est que très partiellement comptabilisé par l'IFN (bois mort depuis moins de 5 ans et encore sur pied). Le bois mort au sol ou mort depuis plus de 5 ans peut représenter une part importante de la carbomasse totale, qui reste à évaluer en France.

Stocks dans les sols

Les stocks ont été obtenus par sommation des valeurs mesurées sur un réseau d'échantillonnage systématique. Si l'échantillonnage des placettes ne semble pas devoir être remis en cause, les valeurs mesurées en chaque site sont par contre entachées de fortes erreurs. En effet, elles sont calculées comme la somme des stocks pour tous les horizons i du sol, qui dépendent eux-mêmes de leur concentration en carbone (C_i), leur masse volumique (densité apparente du sol) et leur épaisseur :

$$C_{sol} = \sum_i (C_i \times \text{densité}_i \times \text{épaisseur}_i)$$

Les concentrations en carbone et les épaisseurs des horizons peuvent être correctement mesurées, mais il en va tout autrement de la masse volumique. Les méthodes existantes sont très hétérogènes et souvent entachées de biais systématiques mal maîtrisés (Dupouey *et al.*, 1997). D'autre part, le nombre de répétitions ou d'échantillons prélevés dans chaque site pour la mesure de la masse volumique ou de la teneur en carbone est très faible (souvent un seul pour les horizons profonds), ce qui accroît fortement les erreurs d'estimation finales. Les stocks de carbone peuvent varier d'un facteur 3 à 5 sur quelques mètres carrés et on a montré, par exemple, qu'une estimation avec moins de 10 % d'erreur du stock de carbone d'un site pouvait nécessiter l'analyse de 30 échantillons au moins (Liski, 1995).

Enfin, l'inclusion de la litière, nécessaire dans l'évaluation des stocks de carbone des sols forestiers, pose à nouveau le problème de la saison de référence choisie pour l'estimation de ces stocks. Afin d'éviter une double prise en compte de ce compartiment, cette saison devrait être la même que celle choisie pour l'estimation des stocks de carbone dans le feuillage. Dans le cadre de grands réseaux d'inventaires, où les dates de passage sont étalées tout au long de l'année, ceci ne pourra être réalisé qu'au travers de l'élaboration de modèles de dynamique saisonnière de la litière.

De nombreuses estimations publiées le sont encore sans précision de la profondeur jusqu'à laquelle est calculé le stock total du sol. Ce paramètre est pourtant fondamental, car de faibles taux de carbone suffisent à faire varier significativement le stock total de carbone, lorsqu'ils sont intégrés sur de fortes épaisseurs. Le but n'est pas tant de connaître le stock total de carbone sur plusieurs mètres d'épaisseur, mais plutôt celui des horizons supérieurs qui risquent le plus d'évoluer à court ou moyen terme (quelques dizaines ou centaines d'années) et dont les limites

ne sont bien sûr pas connues avec exactitude aujourd'hui. Nos calculs ont été faits jusqu'à 30 cm de profondeur.

Stocks dans les produits forestiers

Une première estimation pour la France de la masse de carbone stockée dans le compartiment des produits du bois indique une valeur de 54 MtC (Lochu, 1998), soit 6 % de la biomasse forestière. Cette estimation ne prend pas en compte les bois enfouis dans les décharges qui pourraient représenter un stock du même ordre de grandeur.

ESTIMATION DES FLUX DE CARBONE

Trois types d'approches sont théoriquement possibles pour calculer les flux de carbone nationaux : (a) par comparaison des stocks à différentes dates, (b) par mesure des flux entrants et sortants ou, lorsqu'une mesure directe n'est pas possible, (c) par modélisation de ces flux. Pour les flux liés à la biomasse, les approches (a) et (b) sont possibles et ont déjà été comparées (Dupouey *et al.*, 1999). Pour les flux liés aux sols, seules les méthodes (a) et (c) sont applicables, car on ne sait pas aujourd'hui mesurer les flux entrants et sortants de l'ensemble des sols de France.

Flux liés à la biomasse

L'Inventaire forestier national, grâce à la continuité de son action, permet aujourd'hui d'estimer de façon fiable les flux par comparaison d'inventaires à 10 ans d'intervalle environ. Cette comparaison implique cependant la constance, au cours des différents cycles d'inventaire successifs, des relations allométriques utilisées précédemment pour passer du volume bois fort IFN à la carbomasse totale. Or, certaines de ces relations pourraient changer au cours du temps, entraînant des biais systématiques d'estimation. Il est probable par exemple que la quantité relative de branches diminue, progressivement, dans des peuplements de plus en plus fermés. De même, on observe expérimentalement une augmentation de la concentration en carbone des tissus sous l'effet de l'accroissement du taux de CO₂ atmosphérique.

L'inventaire des flux entrants et sortants permettrait, en parallèle, d'apporter une estimation des flux de carbone indépendante de la précédente et donc de la vérifier. Si le flux entrant de carbone est relativement bien estimé grâce, une fois encore, à l'inventaire de l'accroissement en volume des peuplements fait par l'IFN tous les dix ans, il n'en est pas de même des flux sortants. En effet, les enquêtes annuelles de branche du ministère de l'Agriculture permettent de connaître avec précision les volumes de bois commercialisés. Par contre, les pertes d'exploitation (bois abandonnés ou brûlés entre la récolte et la commercialisation) sont relativement mal connues. Mais surtout, la quantité de bois mis en circulation hors des circuits commerciaux, principalement pour le chauffage domestique, n'est pas inventoriée. Il est donc difficile de boucler le bilan global de carbone de la forêt française. Ce poste devra être mieux étudié.

Flux liés aux sols forestiers et aux produits bois

Nous n'avons aujourd'hui aucune estimation des flux nets de carbone dans les sols, ni de ceux liés aux produits bois, à l'échelle nationale. La mise en place d'un réseau de suivi national des sols est en cours, sous l'égide de l'INRA d'Orléans. En attendant ses premiers résultats, le rééchantillonnage entre 2003 et 2005 des sols du réseau RENECOFOR, échantillonnés dix ans auparavant, apportera des éléments d'information précieux pour 101 sites forestiers.

Le suivi de l'évolution du stock des produits bois en France reste encore à mettre en place. Une telle procédure pourrait être basée sur les statistiques annuelles de la filière-bois, qui permettent d'estimer les flux entrants, et sur des estimations de la durée de vie des produits bois. La fin de vie (par combustion ou par stockage et décomposition dans les décharges) est l'une des étapes les moins bien connues actuellement du cycle des produits forestiers et nécessitera des études appropriées. Il faut souligner par ailleurs l'importance cruciale de la durée de vie des produits bois dans le choix du rôle que nous attribuerons à la forêt pour le stockage de carbone : si cette durée est courte relativement à la longévité des arbres, il est plus efficace de stocker le carbone en forêt ; dans le cas inverse, il est plus efficace de le conserver dans des produits bois.

CONCLUSIONS

Nos calculs de stocks et flux de carbone forestiers améliorent de façon sensible les estimations nationales antérieures, basées sur des modèles souvent trop grossiers : jusqu'ici par exemple, le stock du sol était estimé en proportion fixe du stock dans la biomasse, ce qui apparaît *a posteriori* très éloigné de la réalité. De plus, nous avons pu estimer ces stocks et flux par différentes méthodes (Dupouey *et al.*, 1999 ; Pignard *et al.*, 2000) qui ont donné des résultats proches. Cette convergence est rassurante, mais une des priorités reste encore d'associer un intervalle de confiance aux valeurs obtenues. Enfin, il faut rappeler que les inventaires précédents ne prennent pas en compte le rôle joué par les produits bois dans le bilan du carbone lors de leur utilisation en bois-énergie, à la place de combustibles fossiles, ou dans la construction, lorsqu'ils remplacent des matériaux dont la mise en œuvre est plus consommatrice de carbone fossile. C'est pourtant ce remplacement, et non l'augmentation des stocks de carbone en forêt ou dans les produits bois, qui permet de limiter nos émissions brutes de carbone fossile. On l'aura compris au cours de ce rapide exposé des difficultés inhérentes aux calculs de stocks et flux de carbone nationaux, nos estimations ne sont encore qu'une étape.

Jean-Luc DUPOUEY
Équipe Phytoécologie forestière
INRA-Nancy
F-54280 CHAMPENOUX
(dupouey@nancy.inra.fr)

Gérôme PIGNARD
IFN-Montpellier
Place des Arcades
BP 1001 MAURIN
F-34971 LATTES CEDEX
(gpignard@ifn.fr)

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.

- BERGÈS (L.). — Variabilité individuelle et collective de la croissance et de la densité du bois de *Quercus petraea* (Matt.) Liebl. en relation avec les facteurs écologiques. — Nancy : ENGREF, 1998. — 348 p. (Thèse de Doctorat).
- CANNELL (M.G.R.). — World forest biomass and primary production data. — Londres : Academic Press, 1982. — 391 p.
- CANTIANI (M.). — Ricerche sperimentali di dendrometria e di auxometria. Fascicolo V, Prime indagini sulla biomassa dell'abete bianco, Parte II : Tavola di produttività della biomassa. — Firenze : Università degli Studi - Facoltà di Agraria, 1974. — pp. 41-57.
- DUPOUEY (J.-L.), PIGNARD (G.), BADEAU (V.), THIMONIER (A.), DHÔTE (J.-F.), NEPVEU (G.), BERGÈS (L.), AUGUSTO (L.), BELKACEM (S.), NYS (C.). — Stocks et flux de carbone dans les forêts françaises. — *Comptes Rendus de l'Académie d'Agriculture de France*, vol. 85, n° 6, 1999, pp. 301-318 ; *Revue forestière française*, vol. LIII, n° spécial "Conséquences des changements climatiques pour la forêt et la sylviculture", 2000, pp. 139-154.
- DUPOUEY (J.-L.), THIMONIER (A.), BEHR (P.). — Variations de la densité des sols des hêtraies du Nord-Est de la France en relation avec leurs caractéristiques physico-chimiques. — *Étude et Gestion des Sols*, 4, 1997, pp. 43-52.
- LISKI (J.). — Variation in soil organic carbon and thickness of soil horizons within a boreal forest stand - effect of trees and implications for sampling. — *Silva Fennica*, vol. 29, n° 4, 1995, pp. 255-266.
- LOCHU (S.). — Évaluation des quantités de carbone stocké. Rapport à la Mission interministérielle de l'Effet de Serre. — 1998. — 94 p.
- MATTHEWS (G.). — The carbon content of trees. — *Forestry Commission, Technical paper*, n° 4, 1993, 22 p.
- MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE ET DE LA PÊCHE. — La Forêt et les industries du bois - 2000. Panorama complet de la France forestière. — Agreste GraphAgri, 2000.
- PIGNARD (G.), DUPOUEY (J.-L.), ARROUAYS (D.), LOUSTAU (D.). — Carbon stocks estimates for French forests. — *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.*, vol. 4, n° 4, 2000, pp. 285-289.
- UN-ECE, FAO. — Forest resources of Europe, CIS, North America, Australia, Japan and New Zealand. — New York : United Nations Publication, 2000. — 445 p.
- 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.