



AIDONS NOS FORÊTS À FIXER PLUS DE CARBONE

Compte-rendu final d'une recherche financée par la région Occitanie
(Budget participatif citoyen « Ma solution pour le climat »)

Rapport scientifique

Philippe Leturcq, Gilles Tierle, Gilbert Guillet

28 septembre 2022

Contexte

La cause première du changement climatique actuel est l'augmentation des concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère, avec le dioxyde de carbone (CO₂) au premier rang. Cette augmentation résulte d'un excès des émissions anthropiques de ces gaz par rapport à ce que peuvent absorber les océans et les écosystèmes terrestres. La concentration de CO₂ dans l'atmosphère a ainsi dépassé la barre des 410 ppm en 2020 (ppm : partie par million), à comparer aux 277 ppm de l'époque préindustrielle (1750), ce qui fait peser sur la biosphère une lourde hypothèque [1,2].

La matière ligneuse contenant 50 % de carbone en masse anhydre, la forêt intervient de manière non négligeable dans les deux plateaux de la balance entre émission et capture de CO₂. En France, par exemple, on a le bilan suivant, en ordres de grandeur pour les années récentes : capture par photosynthèse de 165 millions de tonnes de CO₂ par an ; émission annuelle de 80 millions de tonnes, que l'on peut ventiler en 20 millions de tonnes par la décomposition de la nécromasse en forêt (mortalité naturelle, pertes d'exploitation) et 60 millions de tonnes de CO₂ issues de la récolte qui est promise, à terme, à combustion ou décomposition [3, 4].

La forêt française se comporte donc vis-à-vis de l'atmosphère en « puits » net de CO₂ d'environ 85 millions de tonnes annuellement ce qui compense près de 20 % des émissions nationales brutes, de l'ordre de 450 millions de tonnes de CO₂ en 2019 [5].

Pour lutter contre le changement climatique, il est donc important de favoriser la capture de carbone par les forêts et de veiller à ce que l'exploitation forestière et l'utilisation des bois récoltés ne compromettent pas cette fonction vitale de puits de carbone.

Objectif

Dans ce contexte, il apparaît indispensable de caractériser l'aptitude des divers types de peuplements forestiers à capturer et à stocker du carbone, selon les stations, les essences d'arbres et

les modes de gestion, afin de prendre les bonnes décisions dans les initiatives **locales** en matière de sylviculture.

Sylvestre GDF (Groupement de Développement Forestier de l'Ariège), association qui réunit des propriétaires forestiers, des professionnels de la forêt, et de simples amateurs pour promouvoir des méthodes de sylviculture raisonnées et respectueuses de l'environnement, a mis en place chez ses adhérents un réseau de 25 « forêts témoins », en partenariat avec le Parc Naturel Régional des Pyrénées Ariégeoises et d'autres acteurs forestiers (Centre National de la Propriété Forestière, Association Futaie Irrégulière, Alliance Forêts bois, Pro Silva France, Office National des Forêts). Ces « forêts témoins » sont représentatives des différents types de peuplement présents sur le territoire du Parc et le suivi de leur évolution par dendrométrie sur des placettes d'observation peut répondre à cette nécessité de caractérisation pour guider, sur le terrain, les choix sylvicoles contribuant à l'atténuation du changement climatique.

Fondamentaux

Pour un peuplement forestier identifié, le stockage de carbone sur une période déterminée correspond à la somme des masses de carbone accumulées dans les arbres vifs, dans le bois mort, la litière et le sol ainsi que dans les produits façonnés à partir du bois récolté. La figure 1 schématise l'articulation entre les **variations de ces stocks** (en bleu) et les **flux** qui en sont causes. Le bois contenant, quelle que soit l'essence, une proportion de carbone à peu près fixe (50 % en masse sèche), ce schéma s'applique indistinctement aux flux ligneux et aux flux de carbone. Les flux principaux sont celui de capture **brute** de carbone dans l'atmosphère par photosynthèse, à laquelle correspond la productivité biologique (en vert), et les émissions de carbone dans l'atmosphère sous forme de dioxyde (en rouge) ; ces émissions ont pour origine principale : la décomposition de la nécromasse issue de la mortalité naturelle de la végétation et des pertes d'exploitation du bois, la combustion de la part de récolte destinée à l'énergie, la combustion ou décomposition des déchets d'industrie du bois et des produits bois en fin de vie. **Il n'y a aucune raison pour que la capture égale la somme des émissions**, contrairement à ce que présupposent abusivement les tenants de la « neutralité carbone » du système forêt-bois. Selon que la capture l'emporte sur les émissions ou l'inverse, la forêt et son bois jouent le rôle favorable de « puits » de carbone vis-à-vis de l'atmosphère ou celui, opposé, de source.

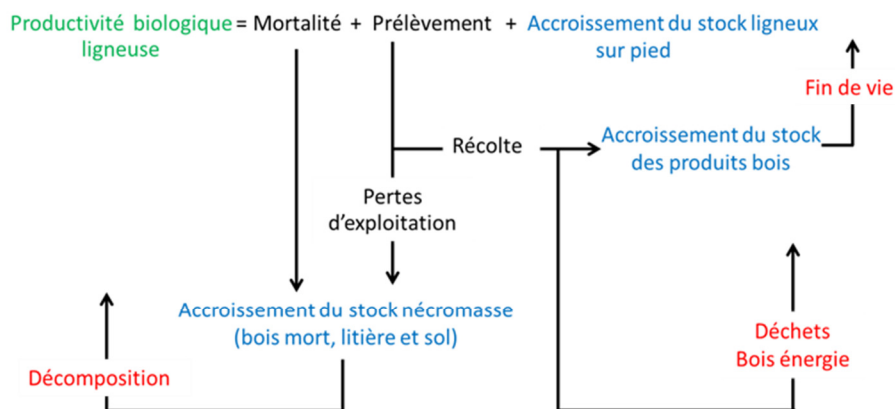


Figure 1 : Flux et variations de stock dans le système forêt-bois

Le puits de carbone effectif correspond à la capture **nette** de carbone, c'est-à-dire à son accumulation dans les trois stocks définis en bleu dans le schéma ci-dessus. Ce sont ces trois stocks et leurs variations qu'évaluent, par exemple, l'IGN (Institut national de l'information géographique et forestière) et l'INRA (Institut national de la recherche agronomique) pour l'ensemble de la forêt française, par traitement statistique d'observations de terrain (Inventaire forestier national) et de données globales sur la récolte et l'utilisation des bois comme combustible ou matériau [3]. Une telle caractérisation est complète mais ne peut être mise en œuvre au niveau d'un peuplement déterminé (forêt-témoin) en l'absence de traçage spécifique des bois récoltés et dans l'impossibilité pratique de quantifier les variations de stock de carbone dans la litière et le sol.

Cependant, la capture du carbone atmosphérique s'effectue essentiellement par l'activité photosynthétique des arbres vifs ; c'est la dynamique de croissance de ces derniers qui est révélatrice de l'aptitude d'une essence ou d'un mélange d'essences à jouer le rôle de puits de carbone dans une station et sous un climat déterminés. Pour comparer les possibilités des stations et des essences, le bon indicateur est donc la **productivité biologique** c'est-à-dire la capture annuelle **brute** de carbone. Si l'on dispose de cette information essentielle, il suffit de retrancher l'accroissement du stock ligneux sur pied pour accéder, comme l'indique la première ligne du schéma de la figure 1, à la somme des flux de mortalité et de prélèvement. L'ensemble de ces données caractérise la contribution du « bois vif » au puits de carbone, celle sur laquelle le gestionnaire forestier peut avoir une action directe. L'objectif de la présente étude se limite donc à déterminer cette contribution pour chacune des forêts témoins du réseau, avec seulement indication d'ordres de grandeur pour les autres postes du « bilan carbone ».

Méthode

La méthode adoptée consiste à mesurer, sur un échantillon d'arbres statistiquement représentatif du peuplement considéré, l'augmentation du volume de bois sur pied et de son contenu carbone sur une période de plusieurs saisons de végétation. Cette augmentation constitue un « indicateur » de croissance et de capture de carbone, image de la productivité biologique du peuplement. Par ailleurs, on évalue les stocks ligneux en début et en fin de période à partir de mesures de surface terrière et de hauteur des arbres en des points d'observation ou placettes convenablement distribués dans le peuplement. Appliqué au stock en début de période, « l'indicateur » permet de prévoir ce que serait le stock en fin de période, abstraction faite de la mortalité et du prélèvement. Par comparaison avec le stock ligneux réellement mesuré en fin de période, on détermine ainsi l'impact de la mortalité et de l'action de récolte sur le stockage de carbone « ligneux » dans le peuplement.

Échantillon - On considère comme « échantillon représentatif », pour chacune des « forêts témoins », l'ensemble des arbres vifs de diamètre mesuré à 1,3 m du sol supérieur à 17,5 cm présents en début **et** en fin de période dans les placettes d'observation. La représentativité de l'échantillon est donc soumise à celle de ces placettes vis-à-vis de l'entier peuplement. Par ailleurs, on fait abstraction de la contribution à la capture de carbone des arbres de diamètre inférieur à 17,5 cm ainsi que de la végétation arbustive et herbacée. Ces choix simplificateurs sont indispensables pour rendre praticable les relevés de terrain avec des moyens humains limités, mais ils peuvent introduire une sous-estimation de la capture dans les forêts fortement hétérogènes ou dans les jeunes peuplements.

Estimation du volume et du contenu carbone de l'échantillon - Le diamètre D et la hauteur H de chacun des arbres de l'échantillon sont les données de base servant au calcul du volume ligneux et de la masse de carbone associée. Pour des raisons purement géométriques, on considère que le volume ligneux d'un arbre est proportionnel à sa hauteur et au carré de son diamètre. Le facteur reliant le produit D^2H au volume ligneux est extrêmement variable d'un arbre à l'autre d'une même essence, ou d'une essence à l'autre, dépendant de la forme de la tige, du plus ou moins grand développement du houppier, de l'importance du système racinaire, et **ce n'est que de manière statistique** que l'on peut appliquer aux arbres de l'échantillon, avec quelque confiance, la valeur de coefficient que propose la littérature pour l'essence ou le groupe d'essences considéré.

Plus précisément, pour le **volume aérien** $V_{aérien}$ (tiges et houppiers) d'un échantillon mono-spécifique, on pose :

$$V_{aérien} = k \sum_i \pi D_i^2 H_i / 4 \quad (1)$$

La sommation est effectuée sur l'approximation « cylindrique » du volume de tige de chaque arbre i de l'échantillon ($\pi D^2 H / 4$). Les valeurs utilisées pour le coefficient k dans le cadre de la présente étude sont issues du projet ANR « Emerge » [6]. Ces valeurs diffèrent peu de 0,5 pour les essences feuillues comme pour les essences résineuses (chêne pédonculé $\approx 0,51$, hêtre $\approx 0,515$, pin sylvestre $\approx 0,475$, douglas $\approx 0,445$, par exemple). Dans l'expression (1), l'approximation « cylindrique » s'appuie sur le diamètre D de tige extrapolé au niveau du sol alors que dans la pratique courante, le diamètre $D_{1,3}$ est mesuré « à hauteur de poitrine » soit, par convention à 1,3 m de hauteur par rapport au sol. Une correction doit donc être faite sur les résultats de mesure. En admettant une décroissance quasi-linéaire du diamètre en fonction de la distance au sol, on a :

$$D = D_{1,3} / (1 - 1,3/H) \quad (2)$$

où la hauteur H de la tige est exprimée en mètres. Cette correction est indispensable pour les arbres qui ne sont pas de grande hauteur : l'erreur commise sur les volumes en absence de correction ne devient inférieure à 10 % que pour les hauteurs H supérieures à 25 mètres.

Le **volume ligneux total** V_{tot} , racines incluses, est obtenu en appliquant au volume aérien un facteur d'expansion « racines » f_{er} dont la valeur est proche de 1,3 selon l'étude « Carbofor » [7] (1,28 pour les feuillus, 1,3 pour les résineux) :

$$V_{tot} = f_{er} k \sum_i \pi D_i^2 H_i / 4 \quad (3)$$

L'infra-densité d de la matière ligneuse (rapport de la masse anhydre au volume frais) présente, en fonction des essences, des valeurs un peu plus dispersées (chêne pédonculé $\approx 0,54$, hêtre $\approx 0,55$, pin sylvestre $\approx 0,44$, douglas $\approx 0,43$, par exemple, selon JL. Dupouey [8]). Par ailleurs, le contenu carbone de la matière ligneuse anhydre est sensiblement 50 % en masse quelle que soit l'essence. Le **stock de carbone** C dans l'échantillon est donc :

$$C = k^* \sum_i \pi D_i^2 H_i / 4 \quad (4)$$

avec :

$$k^* = 0,5d f_{er} k \quad (5)$$

Les valeurs des coefficients k , f_{er} , d et du coefficient global k^* sont répertoriées, pour les principales essences, dans le tableau *in fine*. Pour les essences représentées, la valeur moyenne de k^* est 0,154 et l'écart-type est 0,0235. Les valeurs de k^* sont donc assez bien centrées, avec les variations interspécifiques de l'infra-densité comme cause principale de la dispersion.

Les formules (1), (3) et (4) ne sont applicables, en toute rigueur, qu'à des échantillons mono-spécifiques. Toutefois dans les peuplements où une essence est nettement dominante, l'affectation aux coefficients k , f_{er} et k^* de valeurs correspondant à cette essence ne peut entraîner d'erreur importante en raison de la faible dispersion constatée. Lorsque deux ou même trois essences coexistent en nombre, il est préférable de répartir les arbres de l'échantillon en sous-échantillons mono-spécifiques sous réserve, naturellement, que la taille de chaque sous-échantillon reste suffisante pour justifier un traitement statistique. Enfin, pour les peuplements vraiment mélangés, on peut se contenter d'utiliser les valeurs-types des divers coefficients, soit $k = 0,5$ dans tous les cas et $f_{er} = 1,28$ $d = 0,55$ pour les feuillus, $f_{er} = 1,3$ $d = 0,43$ pour les résineux.

Indicateur de croissance des arbres et de capture du carbone - L'apparente précision des valeurs de coefficients ne doit pas faire illusion : elle répond seulement à un souci de conformité vis-à-vis des données publiées. Il est peu probable, en réalité, que de mêmes valeurs soient applicables, par exemple, à des échantillons de chênes de futaie et à ceux de chênes de taillis, ce qui peut mettre en doute la représentativité des échantillons vis-à-vis de la population d'arbres ayant servi de support à la détermination des coefficients utilisés. Aussi les marges d'incertitude sur les volumes ligneux et les contenus carbone sont-elles importantes, encore que difficiles à cerner.

Par contre, dans la mesure où les valeurs applicables aux coefficients k , f_{er} et d ne changent pas entre le début (0) et la fin (f) de période, les augmentations de volume et de contenu carbone prises **en valeur relative** ne dépendent plus de ces coefficients :

$$\frac{(C_f - C_0)}{C_0} = \frac{(V_{aérienf} - V_{aérieno})}{V_{aérieno}} = \frac{(V_{totf} - V_{toto})}{V_{toto}} = \frac{\sum_i [(D_i^2 H_i)_f - (D_i^2 H_i)_0]}{\sum_i (D_i^2 H_i)_0} = I_{CC} \quad (6)$$

La précision est alors liée à celle des seules mesures dendrométriques. C'est cette augmentation relative qu'on retient comme **indicateur de croissance ligneuse et de capture de carbone** « I_{CC} ». Cet indicateur peut être annualisé en divisant par le nombre N de saisons de végétation.

De l'échantillon au peuplement – Outre les arbres de l'échantillon qui sont choisis permanents, les populations d'arbres recensés dans les placettes d'observation de chaque forêt témoin comprennent, au premier inventaire, des arbres destinés à disparaître en cours de période par mortalité ou prélèvement et, au second inventaire, de jeunes arbres ignorés initialement car de diamètre inférieur à 17,5 cm mais qui, franchissant ce seuil en cours de période, « passent à la futaie » et se trouvent nouvellement recensés (figure 2). Chaque arbre recensé fait l'objet des mêmes mesures dendrométriques que les arbres échantillons, ce qui permet d'évaluer les volumes ligneux sur placettes et leur contenu carbone, en début et en fin de période. Sous réserve de représentativité statistique des placettes d'observation, les résultats obtenus peuvent être ramenés à l'unité de surface de chaque peuplement (hectare) en les divisant par les surfaces cumulées des placettes.

Une variante du protocole – mise en œuvre par l'Association Futaie Irrégulière – passe par un dénombrement d'arbres au relascope de Bitterlich [9] aux différents points d'observation, permettant une estimation directe de la surface terrière cumulée à l'hectare pour la population d'arbres considérée.

En appliquant l'indicateur I_{CC} aux volumes ligneux et au contenu carbone relevés au premier inventaire, on peut prévoir ce que seraient les volumes ligneux et le contenu carbone en fin de période s'il n'y avait ni prélèvement, ni mortalité, ni recrutement de jeunes arbres « passant à la futaie ». L'erreur commise en négligeant « l'effet d'éclaircie » des récoltes et chablis est, au plus, de quelques pour-cent pour les courtes périodes considérées ici (de 4 à 7 ans) et tend vers zéro lorsque les dates de récolte ou chablis se rapprochent de la fin de période. Par comparaison de cette « **projection** » aux volumes ligneux et au contenu carbone réellement constatés en fin de période, on évalue ainsi l'impact du prélèvement et de la mortalité, ou encore du « passage à la futaie », sur la croissance du peuplement et sa fonction de puits de carbone.

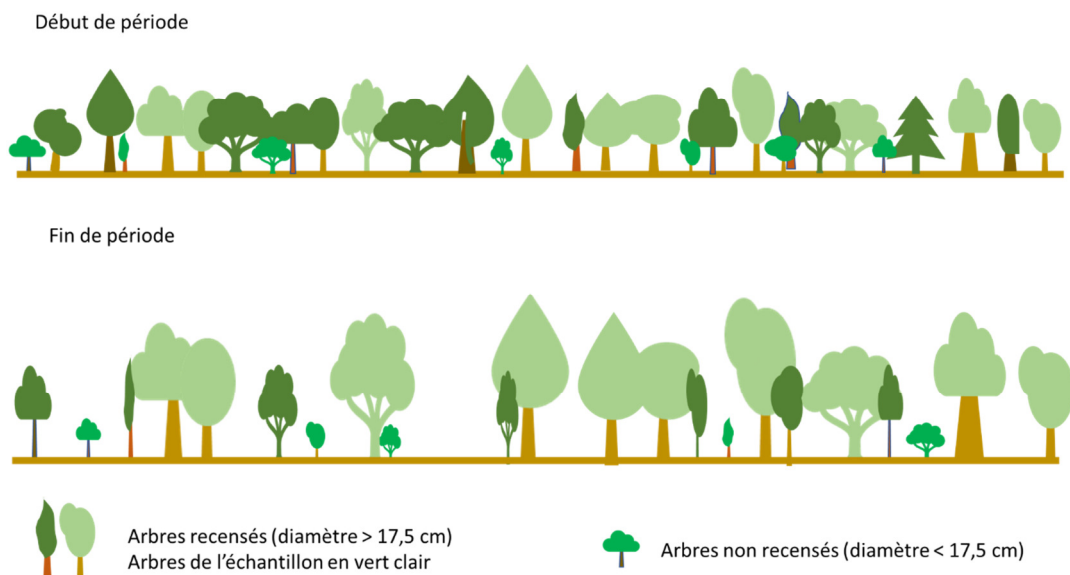


Figure 2 : Représentation des arbres de placettes au début et à la fin de la période d'observation

(pour faciliter la compréhension, la placette », en réalité circulaire, est esquissée linéairement)

Compléments

La méthode décrite ci-dessus met l'accent sur le contenu carbone des arbres sur pied mais laisse dans l'ombre le stockage (ou le déstockage) dans d'autres compartiments : végétation arbustive ou herbacée, fourrés, gaulis et perchis de diamètre à 1,3 m inférieur à 17,5 cm, bois mort sur pied ou au sol, litière et sol, produits bois issus du peuplement étudié. Aussi, dans l'interprétation des résultats présentés ci-après, faut-il garder à l'esprit les ordres de grandeur suivants.

- La présence de gros bois mort sur pied ou au sol est trop erratique pour que des relevés en un nombre nécessairement restreint de points d'observation ou placettes de faible étendue puissent avoir une signification statistique au niveau du peuplement. Cependant, en moyenne

annuelle pour l'ensemble de la forêt française, la mortalité en volume s'élève à $10,2 \times 10^6$ mètres-cubes (période 2009-2017) pour un volume total de bois sur pied (« bois fort tige ») de $2,7 \times 10^9$ mètres-cubes [10], soit un taux un peu inférieur à 0,4 % l'an. Ce pourcentage peut, *a priori*, être retenu comme ordre de grandeur pour les forêts du Parc qui n'ont pas connu d'accident majeur, climatique, météorologique ou sanitaire, entre le début et la fin de la période d'observation.

- Si le peuplement a été exploité au cours de la période s'écoulant entre deux observations, on doit tenir compte de ce qu'une part de la matière ligneuse des arbres prélevés reste sur place. Il s'agit des pertes d'exploitation (menus branchages, purges, abandons) que la pratique permet d'estimer entre 10 % et 15 % du volume aérien, et surtout des racines des arbres abattus, le plus souvent laissées en place, qui comptent pour environ 30 % de ce même volume aérien. On peut donc considérer, « par défaut », qu'en cas d'exploitation entre deux observations, le contenu carbone de la nécromasse ligneuse s'accroît d'à peu près la moitié de celui de la récolte. Cette considération se justifie si le temps écoulé entre deux observations est suffisamment court devant les constantes de temps de décomposition de la nécromasse. Mais, bien sûr, cet apport lié aux pertes d'exploitation s'efface au fil du temps et est promis à disparition à plus ou moins brève échéance.
- Le stock de carbone dans la litière et les couches superficielles du sol est généralement du même ordre de grandeur que le contenu carbone de la biomasse ligneuse mais impossible à quantifier sur placettes sans disposer de moyens spécifiques. Pour la variation de ce stock, on ne peut que donner, à titre indicatif, les valeurs types de 0,2 tC/ha/an sous peuplement feuillu et 0,5 tC/ha/an sous peuplement résineux. Il s'agit des moyennes de relevés en forêt publique sur la centaine de sites du réseau « Rénécofor » [11] ; la marge d'incertitude, cas par cas, est sans aucun doute considérable.
- La contribution des produits bois au stockage de carbone est généralement de peu d'importance pour les raisons suivantes.
 - Sauf cas particulier, une grande partie du contenu carbone des récoltes est renvoyée dans l'atmosphère de manière quasi immédiate. Il s'agit, notamment, de la fraction utilisée comme combustible, directement (bûches, plaquettes) ou consécutivement aux étapes de transformation (connexes de scierie, résidus de trituration...).
 - Les produits bois ont des durées de vie typiques qui vont de quelques mois ou quelques années pour les papiers, cartons et emballages à 10 ou 20 ans pour les panneaux et menuiseries, jusqu'à 75 ans pour les charpentes [12]. En fin de vie, la matière ligneuse de ces produits peut être recyclée, mais la pratique est plutôt de l'utiliser pour l'énergie. Aussi la plus grande part du flux de produits nouveaux ne fait que remplacer le flux des produits parvenant au terme de leur usage. Au niveau national, par exemple, pour une récolte s'élevant annuellement, en France, à environ 60 millions de mètres-cubes, l'augmentation du volume ligneux des produits bois est inférieure à trois millions de mètres cubes [13]. En l'absence de traçage permettant de connaître précisément la destinée des bois récoltés, on considère donc « par défaut » que ce stockage dans les produits bois durables est négligeable.

Résultats bruts

Les tableaux ci-après rassemblent les résultats obtenus pour les différentes forêts témoins du réseau à partir des données de terrain rassemblées par des ingénieurs et techniciens de l'Association Futaie Irrégulière et du CNPF Occitanie, avec l'aide de bénévoles de l'Association « Sylvestre ». Ces résultats auxquels on a joint quelques données descriptives des peuplements, concernent principalement les flux, stocks et variations de stocks ligneux et de carbone associé sur des périodes de temps couvrant de quatre à dix années de végétation.

Le nombre de chiffres significatifs dans l'affichage des résultats répond à la nécessité de pouvoir s'assurer de la cohérence arithmétique des calculs mais ne préjuge pas de la précision des valeurs indiquées. Les valeurs de volume ligneux et de stock de carbone doivent être considérées dans leur seul ordre de grandeur en raison d'une marge d'incertitude étendue pouvant aller, en première estimation, jusqu'à $\pm 40\%$. Cette incertitude résulte notamment de ce que les périodes d'observation sont encore courtes (quelques années) vis-à-vis des temps caractéristiques de l'évolution des peuplements (dizaines d'années ou même siècles), en sorte que les variations de diamètre D et de hauteur H des arbres entre le premier et le dernier recensement effectués sont, en plusieurs cas, comparables aux erreurs de mesure qui sont, au mieux, ± 1 cm pour D , ± 1 m pour H . On a par ailleurs déjà souligné la grande variabilité morphologique des arbres d'une même essence et les doutes sur la validité statistique des coefficients proposés dans la littérature pour passer des données dendrométriques (D , H) aux volumes ligneux aérien puis total. L'indicateur I_{CC} est la seule grandeur dont la précision n'est liée qu'à celle des mesures de diamètre et de hauteur des arbres sur le terrain (cf. eq.6).

L	Résultats bruts	1-Goudou	2-Pastegras	3-Cabosse	4-Barrals C	5-Bousquet
1	Essences	Chêne	Chêne	Chêne	Chêne	Feuillus
2	Altitude	350-450m	400-450m	550m	450-500m	400 m
3	Exposition	Nord	Est-Nord-Est	Sud-Sud-Ouest	Nord-Nord-Ouest	Sud
4	Texture dominante du sol	limono-argileuse	limono-argileuse	argileuse	limono-argileuse	
5	Profondeur	> 80 cm	> 80 cm	> 80 cm	> 80 cm	
6	pH	< 5	< 5	≈ 6	< 5	
7						
8	Période d'observation (années de végétation)	8	8	9	8	7
9	Indicateur ICC annualisé (%) (1)	3,71	6,9	2,85	5,84	3,26
10						
11	Vol. aérien début de période (m3/ha) (2)	326	125	211	177	102
12	Vol. aérien fin de période (m3/ha) (3)	149	194	261	260	123
13	Variation vol. aérien (m3/ha) (4)	-177	69,1	49,7	82,7	20,5
14	Productivité théorique (m3/ha/an) (5)	12,1	8,64	6,01	10,3	3,33
15	Vol. aérien théorique fin de période (m3/ha) (6)	423	194	265	260	126
16	Impact V mortalité et prélèvement (m3/ha) (7)	-274	0	-4,4	0	-2,8
17	Récolte (8)	oui	non	non	non	non
18	Autres perturbations (9)			chablis		
19	Passage à la futaie (m3/ha) (10)	0	8,2	3,7	4,8	23,6
20						
21	Stock de carbone début de période (t/ha) (11)	117	44,9	75,6	63,5	36
22	Stock de carbone fin de période (t/ha) (12)	53,5	69,6	93,4	93,1	43,2
23	Variation stock de carbone (t/ha) (13)	-63,4	24,7	17,8	29,6	7,2
24	Productivité théorique (t/ha/an) (14)	4,33	3,1	2,15	3,71	1,17
25	Stock de carbone théorique fin de période (t/ha) (15)	152	69,6	95	93,1	44,2
26	Impact C mortalité et prélèvement (t/ha) (16)	-98,1	0	-1,6	0	-1

L	Résultats bruts	6-Plagnoulas	7-Montcoustan	8-Rabat	9-Cravives	10-Besseto T
1	Essences	Chêne	Hêtre	Hêtre	Hêtre-Chêne	Châtaignier
2	Altitude	350-450m	550-900m	1100-1200 m	700-800 m	350-450m
3	Exposition	Nord-Est	Nord	Nord-Est	Ouest-Nord-Ouest	Nord-Est
4	Texture dominante du sol	limono-argileuse	limoneuse			limono-argileuse
5	Profondeur	> 80 cm	> 80 cm			> 80 cm
6	pH	< 5	< 5			< 5
7						
8	Période d'observation (années de végétation)	9	8	7	5	9
9	Indicateur ICC annualisé (%) (1)	4,46	4,71	2,34	3,63	5,89
10						
11	Vol. aérien début de période (m3/ha) (2)	314	238	305	262	239
12	Vol. aérien fin de période (m3/ha) (3)	179	323	234	309	365
13	Variation vol. aérien (m3/ha) (4)	-135	85,4	-71,9	46,8	127
14	Productivité théorique (m3/ha/an) (5)	14	11,2	7,15	9,52	14,1
15	Vol. aérien théorique fin de période (m3/ha) (6)	440	327	356	310	365
16	Impact V mortalité et prélèvement (m3/ha) (7)	-261	-4,2	-122	-0,8	0
17	Récolte (8)	oui	non	oui	non	non
18	Autres perturbations (9)		chablis			
19	Passage à la futaie (m3/ha) (10)	0	16,5	10	2,3	180
20						
21	Stock de carbone début de période (t/ha) (11)	113	83,7	107	92,3	71,9
22	Stock de carbone fin de période (t/ha) (12)	64,2	114	82,2	109	110
23	Variation stock de carbone (t/ha) (13)	-48,4	30,1	-25,3	16,5	38
24	Productivité théorique (t/ha/an) (14)	5,02	3,94	2,52	3,35	4,24
25	Stock de carbone théorique fin de période (t/ha) (15)	158	115	125	109	110
26	Impact C mortalité et prélèvement (t/ha) (16)	-93,6	-1,4	-42,9	-0,3	0

L	Résultats bruts	11-Bacquié	12-Sébeille	13-Barrals F	14-Sibada	16-Rimont
1	Essences	Châtaignier	Châtaignier	Feuillus	Feuillus	Feuillus
2	Altitude	450-550m	400-500m	450-500m	400-500m	700-800 m
3	Exposition	Nord-Ouest	Nord-Nord-Est	Nord-Ouest	Nord	Nord, Est et Ouest
4	Texture dominante du sol	limoneuse	limoneuse	limoneuse	limono-argileuse	
5	Profondeur	≈ 50 cm	> 80 cm	> 80 cm	> 80 cm	
6	pH	< 5	< 5	< 5	< 5	
7						
8	Période d'observation (années de végétation)	9	8	8	8	7
9	Indicateur ICC annualisé (%) (1)	2,11	3,33	4,2	4,24	2,68
10						
11	Vol. aérien début de période (m3/ha) (2)	300	273	435	300	302
12	Vol. aérien fin de période (m3/ha) (3)	284	346	536	322	330
13	Variation vol. aérien (m3/ha) (4)	-15,9	72,7	101	21,4	28
14	Productivité théorique (m3/ha/an) (5)	6,33	9,09	18,3	12,7	8,08
15	Vol. aérien théorique fin de période (m3/ha) (6)	357	346	582	402	358
16	Impact V mortalité et prélèvement (m3/ha) (7)	-72,9	0	-45,6	-80,5	-28,6
17	Récolte (8)	oui	non	non	oui	non
18	Autres perturbations (9)			chablis		chablis
19	Passage à la futaie (m3/ha) (10)	31,4	5,3	13,9	9,4	11,3
20						
21	Stock de carbone début de période (t/ha) (11)	90,3	82,1	156	108	106
22	Stock de carbone fin de période (t/ha) (12)	85,5	104	192	115	116
23	Variation stock de carbone (t/ha) (13)	-4,8	21,9	36,1	7,6	9,9
24	Productivité théorique (t/ha/an) (14)	1,91	2,73	6,55	4,57	2,84
25	Stock de carbone théorique fin de période (t/ha) (15)	107	104	208	144	126
26	Impact C mortalité et prélèvement (t/ha) (16)	-21,9	0	-16,3	-28,9	-10

L	Résultats bruts	17-Las ribes	18-Bousсенac	20-Marterat	21-Sarradas	22 Las fittes de Na
1	Essences	Sapin	Sapin	Chêne rouge	Pin laricio	Douglas
2	Altitude	350-450m	1200-1300 m	350-450m	500-600m	500-600m
3	Exposition	Nord-Nord-Ouest	Nord	Nord-Est	Nord-Ouest	Nord-Ouest
4	Texture dominante du sol	argileuse		limoneuse	limoneuse	limoneuse
5	Profondeur	> 80 cm		> 80 cm	≈ 50 cm	> 80 cm
6	pH	≈ 6		< 5	≈ 6	≈ 6
7						
8	Période d'observation (années de végétation)	9	7	9	9	9
9	Indicateur ICC annualisé (%) (1)	4,16	1,84	19,6	5,94	5,49
10						
11	Vol. aérien début de période (m3/ha) (2)	349	644	84,8	392	589
12	Vol. aérien fin de période (m3/ha) (3)	331	494	131	462	749
13	Variation vol. aérien (m3/ha) (4)	-18,2	-150	46,3	70,4	160
14	Productivité théorique (m3/ha/an) (5)	14,5	11,8	16,6	23,3	32,3
15	Vol. aérien théorique fin de période (m3/ha) (6)	480	727	234	601	880
16	Impact V mortalité et prélèvement (m3/ha) (7)	-149	-233	-103	-139	-131
17	Récolte (8)	non	oui	oui	oui	oui
18	Autres perturbations (9)	chablis 35 %				
19	Passage à la futaie (m3/ha) (10)	30,1	8,7	81,5	0	0
20						
21	Stock de carbone début de période (t/ha) (11)	86,3	159	30,4	117	165
22	Stock de carbone fin de période (t/ha) (12)	81,8	122	47	138	209
23	Variation stock de carbone (t/ha) (13)	-4,5	-37	16,6	21	44,7
24	Productivité théorique (t/ha/an) (14)	3,59	2,93	5,95	6,96	9,04
25	Stock de carbone théorique fin de période (t/ha) (15)	119	180	83,9	180	246
26	Impact C mortalité et prélèvement (t/ha) (16)	-36,8	-57,5	-36,9	-41,6	-36,7

L	Résultats bruts	23-Les Poumes	24-Barnal	25-Boudigas	26-Le chartas	27-Couret
1	Essences	Sapin	Douglas-Châtaignier	Chêne	Chêne	Chêne
2	Altitude	400-450m	450-600 m	350-400 m	400-500 m	350-400 m
3	Exposition	Sud-Ouest	Nord	Nord	Nord-Est	Ouest
4	Texture dominante du sol	limoneuse		limono-argileuse	limono-argileuse	limono-argileuse
5	Profondeur	≈ 50 cm		> 80 cm	> 80 cm	> 80 cm
6	pH	< 5		< 5	< 5	< 5
7						
8	Période d'observation (années de végétation)	9	10	6	6	4
9	Indicateur ICC annualisé (%) (1)	11,8	6,9	4,89	3,77	3,16
10						
11	Vol. aérien début de période (m3/ha) (2)	139	309	455	305	562
12	Vol. aérien fin de période (m3/ha) (3)	286	357	426	268	464
13	Variation vol. aérien (m3/ha) (4)	147	48,1	-29,4	-36,6	-98,1
14	Productivité théorique (m3/ha/an) (5)	16,3	21,3	22,2	11,5	17,8
15	Vol. aérien théorique fin de période (m3/ha) (6)	286	522	588	374	633
16	Impact V mortalité et prélèvement (m3/ha) (7)	0	-165	-163	-106	-169
17	Récolte (8)	non	oui	oui	oui	oui
18	Autres perturbations (9)					
19	Passage à la futaie (m3/ha) (10)	121	23,6	12,2	0	5,1
20						
21	Stock de carbone début de période (t/ha) (11)	34,3	87,7	163	109	202
22	Stock de carbone fin de période (t/ha) (12)	70,7	101	153	96,2	166
23	Variation stock de carbone (t/ha) (13)	36,4	13,7	-10,6	-13,1	-35,2
24	Productivité théorique (t/ha/an) (14)	4,03	6,05	7,98	4,12	6,37
25	Stock de carbone théorique fin de période (t/ha) (15)	70,7	148	211	134	227
26	Impact C mortalité et prélèvement (t/ha) (16)	0	-47	-58,3	-37,8	-60,6

(1) L'indicateur I_{CC} est une grandeur **relative**, rapport d'un accroissement de volume ligneux ou de contenu carbone à la valeur initiale de ce volume ou de ce contenu, et ne prend sens qu'accompagné de cette valeur initiale.

(2) Volume aérien, à distinguer du volume « bois fort tige » et du volume ligneux total, celui-ci étant augmenté du volume de la souche et des racines.

(3) Non compris le « passage à la futaie » (volume des jeunes arbres de diamètre inférieur à 17,5 cm, initialement non recensés et franchissant ce seuil en cours de période).

(4) Différence entre les volumes aériens observés en fin et en début de période.

- (5) La productivité théorique, en termes de volume aérien par hectare et par an, est le produit du volume initial et de l'indicateur de croissance et de capture de carbone annualisé (I_{CC}).
- (6) Volume estimé en ajoutant au volume initial le produit de la productivité théorique et du nombre d'années de la période d'observation.
- (7) Différence entre le volume aérien en fin de période et celui qu'on aurait observé s'il n'y avait eu ni mortalité ni prélèvement.
- (8) Les volumes de récolte restent malheureusement inconnus.
- (9) Chablis, incendies, épiphyties, lorsqu'ils sont connus.
- (10) Le volume des arbres « passés à la futaie » qui sont recensés en fin de période, est indiqué « pour information » comme une promesse de pérennité du peuplement. Ces arbres rejoignent ceux primitivement recensés pour constituer le peuplement qui sera observé et analysé dans la période suivante.
- (11) Il s'agit du contenu carbone lié au volume ligneux total.
- (12) Non compris le carbone des arbres « passés à la futaie » en cours de période
- (13) Différence entre les stocks de carbone ligneux observés en fin et en début de période.
- (14) La productivité théorique, en termes de masse de carbone capté par hectare et par an, est le produit du stock de carbone initial et de l'indicateur de croissance et de capture de carbone annualisé (I_{CC}).
- (15) Stock estimé en ajoutant au stock initial le produit de la productivité théorique et du nombre d'années de la période d'observation.
- (16) Différence entre le stock de carbone en fin de période et celui qu'on aurait observé s'il n'y avait eu ni mortalité ni prélèvement.

Sont surlignés en rouge les résultats jugés contraires aux objectifs d'atténuation du changement climatique, en vert les résultats au contraire favorables.

Commentaire

L'analyse de ces résultats fait l'objet d'un document spécifique pour répondre à l'objectif de mise à disposition de propriétaires forestiers des éléments de jugement indispensables à leurs choix de gestion dans un contexte de lutte contre le changement climatique.

Un commentaire immédiat s'impose cependant : les prélèvements de bois en forêt ont un « coût » carbone dont l'importance se mesure non seulement par rapport au stock de carbone primitif du peuplement concerné mais aussi par rapport à ce que serait le stock en l'absence d'exploitation. La question est de savoir si ce « coût » peut être compensé, ou non, par des avantages « carbone » liés aux utilisations des bois récoltés. Les professionnels de la filière forêt-bois et les décideurs politiques, en France et plus généralement en Europe, mettent en avant, en effet, que le rôle de la forêt et du bois dans l'atteinte des objectifs de neutralité carbone peut certes être la captation du carbone atmosphérique par les arbres vifs mais aussi l'approvisionnement en produits ligneux substituables à des combustibles fossiles et à des matériaux énergivores.

Or, les deux options, captation et récolte, sont antinomiques : les tableaux de résultats bruts montrent que la récolte implique une diminution du stock de carbone forestier par rapport à son niveau initial et un « manque à capter » puisqu'on supprime des arbres capteurs dont le remplacement ne peut être immédiat ; il y a donc toujours affaiblissement du puits de carbone forestier par rapport à ce qu'il devrait être en l'absence de prélèvement, et ce, quelle que soit la période de temps considérée.

L'assertion abusive de « neutralité carbone » des usages du bois permet, de manière opportune pour les partisans de la bio-économie, d'arbitrer cette antinomie en faveur d'une exploitation accrue de la ressource ligneuse, le remplacement par du bois de combustibles fossiles et de matériaux étant, dès lors, censé réduire des émissions. L'explication naïve est que « *la neutralité résulte de ce que le carbone capté dans l'atmosphère pour la photosynthèse de la matière ligneuse compense l'émission du bois que l'on brûle ou qui se décompose* ». L'argument est trompeur car il postule l'identité de

deux processus indépendants, capture et émission, qui ne sont, et ne peuvent être, ni égaux ni synchrones !

Plus solide sous son apparente simplicité est l'affirmation que tant que la forêt croît, elle emprunte du carbone à l'atmosphère et le stocke dans le bois, ce qui contribue à l'atténuation du changement climatique ; en brûlant du bois, on rend ce carbone à l'atmosphère, ce qui est contre-productif dans la mesure où des sources d'énergie moins « carbonées » sont disponibles pour répondre aux besoins de chaleur. Cette lapalissade s'applique aussi à l'usage du bois comme matériau si existent des solutions substitutives moins émissives.

C'est là que le bât blesse [14] :

- Le facteur d'émission du bois est de 112 gCO₂/MJ (grammes de dioxyde de carbone par mégajoule de chaleur dégagée) : c'est la valeur-type retenue par le GIEC/IPCC (2006), non « zéro » comme l'affirment les Directives européennes relatives aux énergies renouvelables. Ce facteur d'émission est plus élevé que celui de tout autre combustible. En prenant en compte, pour le bois, les pertes d'exploitation et, pour tous les combustibles, les émissions extrinsèques liées aux opérations qui vont de l'exploitation ou de l'extraction à la mise à disposition, on aboutit à la conclusion qu'en ordre de grandeur, l'émission de gaz à effet de serre par usage du bois pour l'énergie est plus élevée de moitié que celle du charbon, est le double de celle du pétrole, trois fois celle du gaz, pour la même énergie produite. Qualifier de « décarbonée » la chaleur produite à partir du bois (plus généralement à partir de biomasse) est absurde.

- Une autre réalité incontournable est que l'exploitation et l'utilisation des bois récoltés, même en bois d'œuvre, renvoient dans l'atmosphère des quantités considérables de carbone. Les pertes ligneuses à l'abattage, qui comprennent les menus bois, les purges, les souches et racines, et la part de récolte qui est destinée à la trituration ou à l'énergie rendent leur carbone à l'atmosphère à relativement court terme. Seul le bois utilisé en menuiserie ou en charpente peut être considéré comme durable au regard d'horizons de temps compatibles avec les échéances climatiques. Mais dans le cas de chênes de qualité, par exemple, le volume de grume est un peu moins de 50 % du volume ligneux total et le volume de sciages représente 40 à 45 % de celui de la grume ; en conséquence, de l'ordre du cinquième seulement de la masse ligneuse (et du contenu carbone) des arbres abattus peut être durablement conservé, dans les meilleurs cas. Encore faut-il considérer que la récolte ne se limite que rarement à des arbres individuellement choisis et que, pour un arbre de qualité, il peut s'en trouver dix impropres à fournir du bois d'œuvre et qui sont néanmoins abattus pour des emplois non ou peu durables. Ainsi, contrairement à une idée répandue, on ne stocke pas de carbone par les usages « nobles » du bois : on en déstocke !

Certes, les arbres qu'on abat sont, en règle générale, remplacés. Mais il faut compter d'ordinaire plusieurs dizaines d'années, le siècle parfois, avant que le stock de carbone initial ne soit reconstitué et attendre plus longtemps encore avant que le stock qu'on aurait fini par accumuler en l'absence de coupe soit égalé par le peuplement régénéré. Or, les échéances climatiques sont proches (2050 : émission nette « zéro » en Europe, 2100 : limitation à 2°C de l'élévation de température globale).

Augmenter les prélèvements pour faire jouer des effets de substitution soi-disant « bénéfiques » est donc une option inconséquente. Cela ne veut pas dire que l'exploitation et l'utilisation du bois produit par les forêts ne sont pas légitimes, mais seulement que cette exploitation et cette utilisation

ne peuvent être justifiées par des objectifs d'atténuation du changement climatique. Le bois a suffisamment de qualités propres pour qu'il ne soit pas nécessaire d'en rajouter inconsidérément de mythiques. Dans le contexte du changement climatique, l'exploitation forestière et l'usage du bois ne devraient répondre qu'aux seules nécessités techniques, économiques, sociales ou sociétales, avec le contrôle strict d'une comptabilité carbone précise (postuler la « neutralité carbone » du bois n'est pas une pratique admissible de comptabilité carbone). Il est regrettable que les règles de comptabilité carbone édictées par le GIEC/IPCC en la matière [15, 16] restent négligées ou ignorées par les milieux professionnels de la forêt et du bois ainsi que par les décideurs politiques, notamment en Europe et en France.

Bibliographie

- [1] Friedlingstein, P. *et al.*: Global Carbon Budget 2020, *Earth Syst. Sci. Data*, 12, 3269–3340, <https://doi.org/10.5194/essd-12-3269-2020>, 2020.
- [2] GIEC/IPCC : Climate Change 2022, Impacts, Adaptation and Vulnerability, Summary for Policy Makers, Working Group II contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 27 February 2022.
- [3] Roux, A. et Dhôte, J.F. (Coordinateurs) *et al.*, 2017. Quel rôle pour les forêts et la filière forêt-bois françaises dans l'atténuation du changement climatique ? Une étude des freins et leviers forestiers à l'horizon 2050. *Rapport d'étude pour le Ministère de l'agriculture et de l'alimentation*, INRA et IGN.
- [4] du Bus de Warnaffe, G. et Angerand, S., 2020. Gestion forestière et changement climatique, une nouvelle approche de la stratégie nationale d'atténuation. *Étude Fern-Canopée*.
- [5] Citepa, 2021. Inventaire des émissions de gaz à effet de serre en France de 1990 à 2019. Rapport National d'Inventaire pour la France au titre de la Convention cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques et du Protocole de Kyoto.
- [6] Deleuze, C., *et al.* : Estimer le volume total d'un arbre, quelles que soient l'essence, la taille, la sylviculture, la station. *Rendez-vous Techniques de l'ONF*, Office national des forêts, 2014, pp.22-32. hal-01143797
- [7] Carbofor, 2004. Séquestration de Carbone dans les grands écosystèmes forestiers en France, Coordination D. Loustau, Unité EPHYSE, INRA Bordeaux, Juin 2004.

- [8] Gleizes, O., 2017. Faire un diagnostic carbone des forêts et des produits bois à l'échelle d'un territoire (étude de faisabilité Climafor) – Rapport final, ADEME, 118 p.
- [9] Pardé, J. Un appareil révolutionnaire : Le rélascope à miroir de Bitterlich. *Revue forestière française*, 1956, pp.172-184. [ff10.4267/2042/27180ff](https://doi.org/10.4267/2042/27180ff). [ffhal-03383800f](https://doi.org/10.3383800f)
- [10] IGN, 2021. Les indicateurs de gestion durable des forêts françaises métropolitaines. Sixième édition (2020). Institut national de l'information géographique et forestière. Édité le 03/08/2021.
- [11] Jonard M. et al., 2017. Forest soils in France are sequestering substantial amounts of carbon. *Science of the Total Environment* 574 (2017) 616–628
- [12] FCBA, 2012. Carbone. Carbone Forêt-Bois : Des faits et des chiffres.
- [13] Deroubaix, G., 2017. Flux et stocks de carbone dans les produits bois : prise en compte dans les déclarations environnementales. JEMAB 2017 Atelier 3 : Labels et réglementation carbone.
- [14] Leturcq, Ph., 2020. GHG displacement factors of harvested wood products : the myth of substitution. *Scientific Reports*, 10, 20752 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-77527-8>.
- [15] IPCC, 1996. Revised 1996 Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories – Reference manual – Chapter 5 Land-Use Change & Forestry.
- [16] IPCC, 2006. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T. and Tanabe K. (eds). Published: IGES, Japan. Volume 4: Agriculture Forestry and Other Land Use, Chapter 4 : Forest Land

ANNEXE

Valeurs des coefficients utilisés [6, 7, 8]

Essences	<i>k</i>	<i>fer</i>	<i>d</i>	<i>k*</i>
Feuillues		1,28		
Erable champêtre	0,51		0,56	0,183
Erable sycomore	0,49		0,51	0,16
Bouleau	0,47		0,52	0,156
Charme	0,5		0,61	0,195
Hêtre	0,515		0,55	0,181
Frêne	0,5		0,56	0,179
Merisier	0,5		0,5	0,16
Chêne	0,51		0,56	0,183
Chêne rouge	0,48		0,56	0,172
Résineuses		1,3		
Sapin pectiné	0,52		0,38	0,128
Cèdre	0,48		0,36	0,112
Mélèze	0,49		0,48	0,153
Epicéa	0,49		0,37	0,118
Pin Laricio	0,46		0,46	0,138
Pin noir	0,5		0,46	0,15
Pin maritime	0,49		0,46	0,147
Pin sylvestre	0,47		0,44	0,134
Pin à crochets	0,54		0,44	0,154
Douglas	0,45		0,43	0,126