



INSTITUT NATIONAL
DE L'INFORMATION
GÉOGRAPHIQUE
ET FORESTIÈRE

DIRNE/DEP

**Direction interrégionale
Nord-Est**

Mars 2018

Contribution de l'IGN à l'établissement des bilans carbone des forêts des EPCI concernés par un PCAET - volet dendrométrique

Rapport d'étude pour l'ADEME

VERSION 1.0

SUIVI DU DOCUMENT

Date	Version	Auteur	Action	Organisme
29 mars 2018	1.0	Antoine COLIN	Rédaction	IGN DIRNE

I- CONTEXTE ET OBJECTIFS DE L'ETUDE	2
II- SUPERFICIE CARTOGRAPHIEE DES FORETS DANS LES EPCI	3
III- DONNEES D'INVENTAIRE FORESTIER NATIONAL (IFN)	3
III -1 PRESENTATION GENERALE DE L'ENQUETE IFN	3
III-1.1 METHODE D'INVENTAIRE	4
III-1.2 FORETS DISPONIBLES POUR LA PRODUCTION DE BOIS	4
III-1.3 RESOLUTION SPATIALE DES DONNEES IFN	5
III -2 DONNEES QUANTITATIVES IFN	5
III-2.1 CAMPAGNES D'INVENTAIRE	5
III-2.2 SUPERFICIE BOISEE	5
III-2.3 STOCK DE BOIS SUR PIED	6
III-2.4 PRODUCTION BIOLOGIQUE	7
III-2.5 PRELEVEMENTS DE BOIS	7
III-2.6 MORTALITE ET CHABLIS	8
III-2.7 BILAN ANNUEL DES FLUX ET TAUX DE PRELEVEMENT SUR LA PERIODE 2006-2015	8
III -3 CONVERSIONS DES VOLUMES DE BOIS EN STOCK DE CARBONE DANS LA BIOMASSE LIGNEUSE	8
III -4 DONNEES QUALITATIVES UTILISEES EN VENTILATION DANS L'ETUDE	8
IV- PRESENTATION DES LIVRABLES	9
IV -1 PRESENTATION DES DONNEES	9
IV -2 EXPLOITATION DES DONNEES	10
V- PRINCIPAUX RESULTATS	10
V -1 PUIITS DE CARBONE MOYEN A L'HECTARE DANS LA BIOMASSE LIGNEUSE	10
V -2 COEFFICIENT DE PASSAGE DU M3 IFN AU STOCK DE CARBONE SUR PIED	11
VI- DISCUSSION ET PRECAUTIONS D'USAGES	11
VI -1 DES RESULTATS STATISTIQUES ASSORTIS D'UN INTERVALLE DE CONFIANCE	11
VI -2 LES MOYENNE REGIONALES PEUVENT ETRE LOCALEMENT FAUSSES	11
VI -3 UN BILAN CO2 REGIONAL PEUT MASQUER DES DYNAMIQUES LOCALES TRES DIFFERENTES	12
VII- PERSPECTIVES POUR AFFINER LES DIAGNOSTICS FORET-CARBONE DES TERRITOIRES	13
BIBLIOGRAPHIE	14

I- Contexte et objectifs de l'étude

Au titre de l'article 1er du décret n° 2016-849 du 28/06/2016 relatif aux Plans climat air énergie territorial (PCAET), tous les EPCI de plus de 20 000 habitants ont l'obligation, avant la fin de l'année 2018, d'intégrer un diagnostic comprenant l'estimation de la séquestration nette de CO₂ : « *Le diagnostic comprend : une estimation de la séquestration nette de dioxyde de carbone et de ses possibilités de développement, identifiant au moins les sols agricoles et la forêt, en tenant compte des changements d'affectation des terres ; les potentiels de production et d'utilisation additionnelles de biomasse à usages autres qu'alimentaires sont également estimés, afin que puissent être valorisés les bénéfiques potentiels en termes d'émissions de gaz à effet de serre, ceci en tenant compte des effets de séquestration et de substitution à des produits dont le cycle de vie est plus émetteur de tels gaz* ».

Dans son rôle de soutien aux territoires, l'ADEME a publié un guide (source : <http://www.territoires-climat.ademe.fr/>) offrant aux collectivités concernées un cadre méthodologique pour intégrer la contribution du secteur forêt-bois à l'atténuation des émissions de CO₂.

La méthode développée par le MTES et proposée dans le guide décompose l'estimation du bilan carbone du secteur forêt-bois en quatre volets. Un des 4 volets concerne la séquestration directe dans la biomasse, pour laquelle le guide précise :

« **Diagnostic à réaliser à minima** : une première approximation consiste à estimer la séquestration forestière directe liée aux forêts non défrichées (sachant que cette « séquestration » sera souvent positive : on parle alors de « puits de carbone » forestier ; si elle est négative, cela signifie qu'en réalité la forêt émet plus de carbone qu'elle n'en capte : elle est alors émettrice nette) :

- multiplier la surface de la forêt sur le territoire de l'EPCI par la séquestration forestière nette moyenne par hectare de forêt (hors Outre-Mer, où on considère que cette séquestration est nulle), soit - **4,8 teqCO₂/ha/an***.

* Cette valeur de 4,8 teqCO₂/ha/an est obtenue en divisant la séquestration forestière totale hors Outre-Mer, soit 70 MteqCO₂, par la surface de forêts, de l'ordre de 14,7 Mha.

NB : il s'agit de l'équivalent en CO₂ du carbone atmosphérique net absorbé par la forêt (correspondant au bilan entre la photosynthèse et la respiration des arbres), auquel sont retranchées les émissions associées à la mortalité des arbres et aux prélèvements de bois (le carbone correspondant aux volumes de bois morts ou prélevés étant considéré comme immédiatement réémis vers l'atmosphère sous forme de CO₂). ».

Pour réaliser leurs diagnostics forestiers, les EPCI peuvent au choix :

- Appliquer la méthode et les valeurs de séquestration de carbone par défaut proposées dans le guide publié par l'ADEME ;
- Opter pour une méthode adaptée à leurs contextes locaux, notamment au travers de la démarche Climagri.

Dans ce cadre général, l'ADEME a constitué un groupe national d'experts pour analyser la méthode décrite dans le guide et l'actualiser le cas échéant.

Plus spécifiquement, l'ADEME a demandé à l'IGN de produire des jeux de coefficients de séquestration de carbone dans la biomasse forestière adaptés aux grands types forestiers rencontrés sur le territoire métropolitain (les DOM ne sont pas concernés). Concrètement il s'agit de :

- Mettre à jour et d'étoffer le chiffre moyen par défaut de -4,8 teqCO₂/ha/an publié dans le guide précédemment cité.
- Fournir des données détaillées sur les flux de carbone (production biologique, mortalité naturelle, voire prélèvements actuels) des principaux écosystèmes forestiers métropolitains. Ces données devraient notamment être utilisables dans la démarche Climagri qui vise à établir un diagnostic précis et à évaluer les impacts des plans d'actions.

II- Superficie cartographiée des forêts dans les EPCI

L'IGN réalise la cartographie des essences des forêts françaises. Cette carte est intitulée BD Forêt®. Elle est réalisée par photo-interprétation à partir de photographies aériennes départementales en infrarouge couleur. Chaque plage cartographiée de plus de 0,5 ha se voit attribuer par un photo-interprète forestier de l'IGN un type de formation végétale dans une nomenclature à 32 modalités (exemple : chênaie pure, hêtraie pure, sapinière pure, mélanges de feuillus, etc.).

La production de la version 2 de la BD Forêt a été initiée en 2005 et elle est aujourd'hui disponible pour plus de 90 % des départements métropolitains. Pour les départements manquants, la BD Forêt v1 cartographie les peuplements de plus de 2,25 ha.

Une présentation détaillée de la BD Forêt est consultable ici : <http://professionnels.ign.fr/bdforet>

Pour les besoins de cette étude, les types cartographiés de la BD Forêt ont été regroupés en 5 grandes catégories de peuplements : majoritairement feuillus / majoritairement résineux / mixtes / peupleraie / jeunes peuplements et surface momentanément déboisée.

Pour chaque EPCI (liste disponible en février 2018) dans chaque sylvoécocorégion (SER) et dans chaque département administratif, on a calculé la surface représentée par les cinq types BD Forêt regroupés.

Il est important de retenir que la surface cartographiée de BD Forêt n'est pas la surface de référence de l'inventaire forestier national (voir le chapitre 3.2.2) et que les types cartographiés ne sont pas nécessairement les mêmes que ceux que relève l'IFN. En effet les deux données répondent à des cahiers des charges différents (photo-interprétation pour la BD Forêt, inventaire de terrain pour l'IFN) et elles sont indépendantes.

III- Données d'inventaire forestier national (IFN)

III -1 Présentation générale de l'enquête IFN

Les forêts métropolitaines couvrent un tiers du territoire national métropolitain avec 16,7 millions d'hectares (Mha) et s'accroissent de 1 Mha par décennie, ce qui en fait la deuxième occupation des sols après l'agriculture, et atteste de son rôle structurant sur les territoires. Le volume de bois qu'elles contiennent est le troisième plus important d'Europe après celui de l'Allemagne et la Suède. Il a doublé en 50 ans, traduisant l'opportunité stratégique et économique de l'existence de cette ressource en bois pour la France. Le puits de carbone de la forêt française est le premier en Europe. Les forêts françaises sont également les plus diversifiées d'Europe en espèces. Elles forment le premier stock de bois feuillu. Par l'approvisionnement en matériaux, énergies et molécules vertueuses, la filière forêt-bois constitue un fondement de la croissance verte, à l'origine de la stratégie européenne pour la bioéconomie. Parce que ces ressources sont renouvelables, et doivent être gérées, la filière forêt-bois est une source d'emploi dans de nombreux territoires.

Dans ce contexte non-stationnaire, et porteur d'enjeux sans précédents, une information systématique et renouvelée des territoires forestiers est cruciale pour appuyer les politiques publiques visant la valorisation des forêts. En France comme dans tous les pays européens, l'inventaire forestier statistique garantit indépendance et objectivité. Créé en 1958 par Ordonnance du Général de Gaulle, et intégré au Code Forestier (obligation d'inventaire permanent des forêts), l'inventaire a été reconnu enquête statistique publique par le CNIS en 2017.

L'information produite par cet inventaire est valorisée par un appui ciblé et prospectif aux acteurs politiques et économiques, privés et publics, sur des territoires locaux à nationaux. C'est le rôle de la mission d'expertise forestière, placée à l'IGN aux côtés de l'inventaire.

Depuis 2005, l'IGN réalise l'inventaire permanent (annuel) et national des ressources forestières françaises métropolitaines. Cette enquête statistique s'appelle « inventaire forestier national » ou IFN. Il en existe dans

tous les pays du monde. L'enquête IFN produit à la fois une estimation de la superficie boisée et du volume des arbres qu'elle contient. Toutes les propriétés, publiques et privées, sont inventoriées. En 2017 le Conseil national de l'information statistique (CNIS) a labellisé l'IFN « enquête statistique d'intérêt public ».

III-1.1 Méthode d'inventaire

L'échantillon statistique IFN est réparti de manière systématique dans l'espace et dans le temps. Il est réalisé en 10 campagnes annuelles successives. Avec près de 7000 nouvelles placettes d'observation visitées chaque année sur l'ensemble du territoire national, de nombreuses informations contribuent directement à la caractérisation et l'évaluation de la ressource forestière et du bilan carbone de la biomasse ligneuse.

La méthode d'inventaire comprend deux phases statistiques successives :

La première phase de l'inventaire consiste en une photo-interprétation ponctuelle. A partir de l'orthophotographie départementale de référence (BD Ortho), des informations relatives à la couverture du sol et à son utilisation sont notées sur des placettes de 25 mètres de rayon entourant les points d'inventaire. L'interprétation porte chaque année sur un échantillon d'environ 80 000 points. Ces informations contribuent à une première estimation de la surface du territoire selon la couverture et l'utilisation du sol.

La deuxième phase de l'inventaire consiste à collecter en forêt des informations détaillées sur une sous-population des points photo-interprétés « forêt » lors de la première phase d'inventaire. Les mesures en forêt s'exécutent de novembre à octobre de l'année suivante. Les points d'inventaire sont matérialisés sur le terrain par un piquet, centre de quatre placettes circulaires et concentriques de 6, 9 et 15 et 25 m de rayon. Les descriptions et mesures concernent le milieu, le sol, la végétation arborée et la flore. Plusieurs dizaines de données qualitatives et quantitatives sont ainsi collectées selon un protocole national rigoureux.

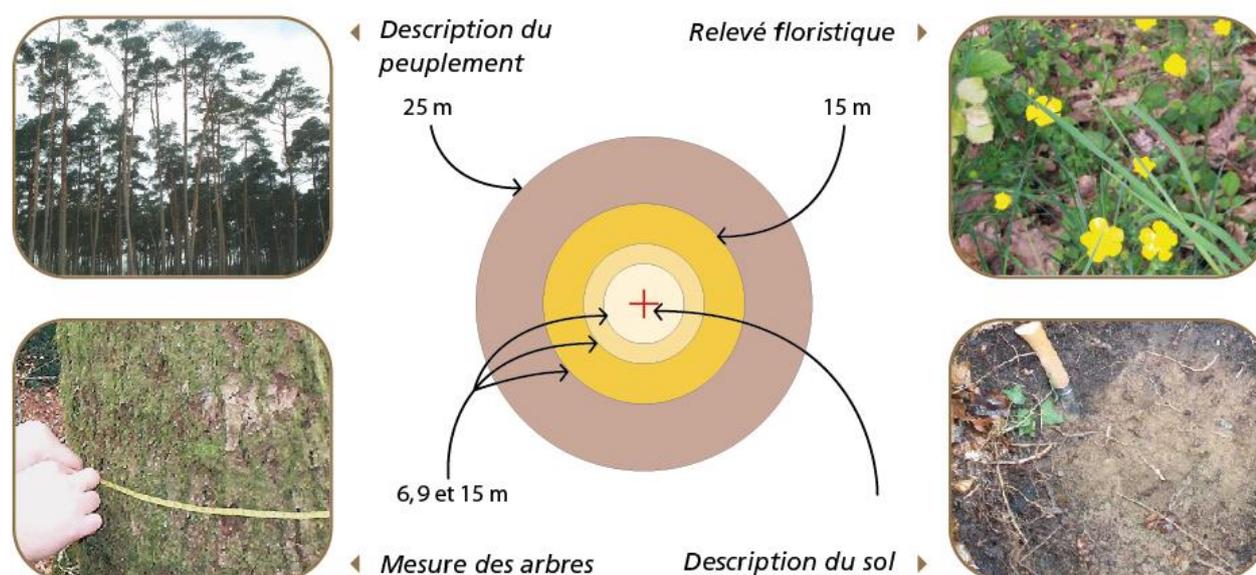


Figure 1 : Placettes d'observation de l'inventaire forestier national

Depuis 2010, l'IFN ré-inventorie les points mesuré 5 ans auparavant afin de mesurer les arbres qui ont été prélevés au cours de la période. Les levés de terrain ont porté par exemple sur 7 479 points durant la campagne 2014 auxquels il faut ajouter la visite de 5 700 points déjà inventoriés il y a 5 ans.

III-1.2 Forêts disponibles pour la production de bois

L'IGN détermine pour chaque point de l'échantillon IFN la nature de la couverture du sol (forêt, lande, terrains artificialisés, etc...). Depuis 2005, l'IGN a adopté la définition de la forêt (Food and Agriculture Organisation of the United Nations, FAO) : « La forêt est un territoire occupant une superficie d'au moins 50 ares avec des arbres pouvant atteindre une hauteur supérieure à 5 m à maturité in situ, un couvert boisé de plus de 10 % et

une largeur moyenne d'au moins 20 mètres. Elle n'inclut pas les terrains dont l'utilisation du sol prédominante est agricole ou urbaine. »

Les couvertures boisées avec une utilisation agricole ou urbaine prédominante ne sont pas considérées comme de la forêt.

L'IGN distingue les forêts « disponibles pour la production de bois » des « autres forêts ». Les forêts disponibles pour la production de bois sont celles pour lesquelles la production n'est pas rendue impossible par des contraintes physiques (falaise, ravin non accessible, marécage inaccessible, accès à plus de deux heures de marche, accès à pied avec un dénivelé positif de plus de 600 m ...), des contraintes d'usage (certains terrains militaires) ou réglementaires (réserve biologique intégrale, protection contre l'érosion...).

Les données dendrométriques de l'IFN ne sont relevées que sur les points situés en forêt de production.

III-1.3 Résolution spatiale des données IFN

L'IFN produit les informations nécessaires au développement des politiques publiques et des stratégies privées aux échelles nationales, régionales et des grands bassins de production.

Schématiquement les données IFN sont utilisables jusqu'à des massifs de 20 000 ha boisés. En deçà la précision statistique de l'outil est insuffisante.

III -2 Données quantitatives IFN

III-2.1 Campagnes d'inventaire

Les stocks actuels (surfaces, volume et stock de carbone) sont estimés à partir des 5 campagnes annuelles de mesure réalisées de 2011 à 2015. Ainsi les stocks actuels font référence à l'année moyenne 2013.

La production biologique et la mortalité naturelle sont estimées à partir des 5 campagnes annuelles de mesure réalisées de 2011 à 2015, soit des flux concernant la période 2006-2015. Les prélèvements de bois sont mesurés sur les points des 5 campagnes annuelles d'inventaire 2006 à 2010. Ces points ont fait l'objet de remesure entre 2011 et 2015, pour mesurer les prélèvements sur la période 2006-2015. Ainsi, les flux de bois font référence à une période 2006-2015.

De façon standard, les résultats publiés par l'IGN correspondent à une année moyenne calculée à partir de 5 fractions annuelles (appelées « campagnes ») de l'échantillon. L'utilisation de cette période de temps permet de baser les calculs sur un nombre plus important de données. Cela permet d'améliorer la précision statistique des résultats ou, à précision identique, de les ventiler selon davantage de critères. La précision temporelle s'en trouve quant à elle dégradée (puisqu'il s'agit d'une moyenne sur 5 ans), mais il est considéré qu'elle reste acceptable en raison des pas de temps longs d'évolution des peuplements forestiers.

III-2.2 Superficie boisée

Avec l'IFN la superficie forestière est estimée suivant une approche statistique à partir des observations collectées lors de la première et de seconde phase d'inventaire. Cette dernière permet de confirmer ou infirmer ce qui a été vu sur les photographies aériennes.

Le calcul de surface par l'inventaire forestier s'appuie donc sur la grille systématique de points qui couvre l'ensemble du territoire, ce dernier ayant une surface connue. Schématiquement, la surface forestière est estimée comme étant la proportion de points classés en forêt. L'estimateur de la surface est en fait plus complexe car les calculs sont effectués en deux étapes et selon des strates. La surface étant estimée de manière statistique, elle est assortie d'un intervalle de confiance.

L'enquête IFN mesurant à la fois la superficie et les volumes, tous les résultats exprimés en volume et stock de carbone à l'hectare font référence à cette superficie statistique.

Comparaison avec la surface issue de la carte forestière BD Forêt

La comparaison des superficies issues de l'IFN et de la BD Forêt peut présenter des écarts parfois importants, en faveur de la superficie cartographiée. Les écarts peuvent concerner la superficie totale de forêt et /ou la superficie des types de peuplements.

La principale raison est que la BD Forêt correspond à une cartographie de la couverture du sol. L'utilisation du sol n'est pas connue, sauf si celle-ci est clairement visible du ciel. Sur le terrain, une couverture boisée avec un usage prédominant agricole ou urbain, n'est pas inventoriée alors qu'elle sera cartographiée dans la BD Forêt.

D'autres facteurs génèrent des écarts entre les deux sources de données :

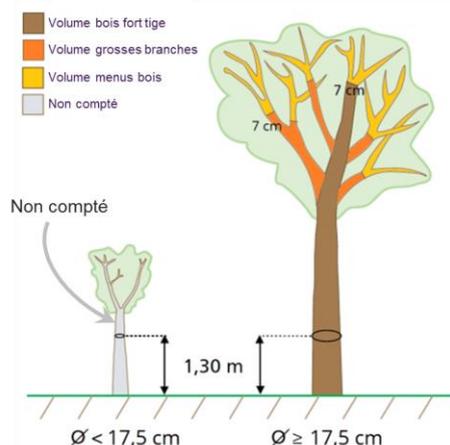
- La BD Forêt est réalisée par photo-interprétation, elle prend donc en compte comme limite de la forêt la bordure des houppiers. La limite réelle de la forêt levée sur le terrain dans le cadre de l'inventaire peut être différente de quelques mètres (houppier au-dessus d'un pré, houppiers couvrant une route forestière, etc.). Ce phénomène a donc tendance à amplifier la superficie forestière cartographiée. Ceci est d'autant plus vrai que les forêts sont de petite taille avec un périmètre /superficie élevé. Par exemple, si les houppiers d'une forêt rectangulaire de 2 ha (200 m* 100 m) isolée au milieu des prés débordent de 2 m sur le pré, la superficie cartographiée sera supérieure de 1216 m² (0,6 %) à la superficie inventoriée sur le terrain par l'IFN.
- Dans la BD Forêt chaque peuplement de plus de 0,5 ha est photo-interprété selon un type de peuplements (feuillus, résineux, mixtes). Pour l'IFN le type de peuplement est déterminé en forêt sur la placette de 25 m de rayon (20 ares) à partir du couvert de chaque essence.
- La production de la BD Forêt s'appuie sur des prises de vues aériennes millésimées qui ne correspondent pas forcément aux mêmes années que les relevés de terrain. L'ancienneté de la BD Forêt peut atteindre 10 ans dans certains départements. La superficie statistique IFN est plus correcte que la superficie cartographiée car elle a fait l'objet d'une confirmation de l'état boisé l'année de l'inventaire de terrain. Dans l'IFN la mesure des volumes et des superficies est synchrone.

Enfin, il convient de rappeler que l'IFN fournit des résultats statistiques avec un intervalle de confiance. Si la superficie de la carte forestière est comprise dans cet intervalle de confiance, alors les résultats sont à considérer comme équivalents.

III-2.3 Stock de bois sur pied

Sur chaque point IFN, les arbres sont mesurés sur un cercle de 6 m de rayon pour les petits bois (diamètre à 1,30 m des arbres compris entre 7,5 et 27,5 cm exclu), de 9 m pour les bois moyens (diamètre compris entre 27,5 et 37,5 cm exclu) et de 15 m pour les gros et très gros bois. Les mesures sur les arbres concernent la circonférence à 1,30 m de hauteur, la hauteur, l'épaisseur des cernes des 5 dernières années, etc. L'essence de chaque arbre est notée.

La ressource en bois est évaluée à partir des mesures de circonférence à 1,30 m, de hauteur totale, de hauteur à la découpe bois fort ou à la hauteur du premier défaut (hauteur de décrochement), etc... Les résultats dendrométriques (volume, production biologique, mortalité, prélèvements) sont calculés sur les arbres dont la circonférence à 1,30 m est supérieure à 23,5 cm (soit 7,5 cm en diamètre), à l'aide de modèle statistique appelés « tarifs de cubage ». Par défaut, tous les volumes calculés par l'IGN concernent le tronc, écorce incluse, entre le sol et la découpe fin bout de 7 cm en haut de l'arbre, en n'incluant qu'une seule branche maîtresse.



D'autres tarifs de cubage permettent de calculer le volume aérien total (Carbofor et Vallet 2004), c'est-à-dire incluant les grosses et les petites branches.

III-2.4 Production biologique

La production biologique est calculée à partir de la mesure de l'accroissement radial sur 5 ans obtenu par carottage des arbres. Le volume produit au cours des 5 dernières années peut être calculé au niveau de chaque arbre et on en déduit la production annuelle moyenne.

La production biologique de la forêt est la somme de quatre composantes :

- la production des arbres vivants et non chablis à l'année n , qui sont recensables (plus de 7,5 cm de diamètre) ;
- la production des arbres qui ont été coupés entre l'année $n-5$ et l'année n (constatés sur les points « deuxième visite »). On considère que ces arbres ont été coupés à mi-période et on ajoute $\frac{1}{2}$ production sur 5 ans ;
- la production des chablis ordinaires de moins de 5 ans (pour la moitié de la période) ;
- la production des arbres morts, considérée comme nulle.

Le recrutement, qui correspond au volume des arbres qui sont devenus recensables (qui ont atteint les 7,5 cm de diamètre sur la même période de 5 ans), est comptabilisé dans la production des arbres vifs. La mesure faite lors de la campagne n correspond à l'accroissement des années de croissance et donc des campagnes $n-1$, $n-2$, $n-3$, $n-4$ et $n-5$.

La production biologique des arbres vifs fournie est calculée à partir des mesures réalisées entre 2011 et 2015. Il s'agit donc d'une production calculée **à partir des cerne de croissance des années 2006 à 2014** (cerne le plus ancien remontant à 2006 pour les mesures faites en 2011 et cerne le plus récent datant de 2014 pour les mesures faites en 2015).

III-2.5 Prélèvements de bois

Grâce aux revisites des points inventoriés 5 ans plus tôt, il est possible de connaître les prélèvements réalisés entre la mesure initiale (année $n-5$) et le retour (année n). Sur les points où au moins un prélèvement de moins de 5 ans est signalé, chaque arbre qui était vivant et inventorié au passage précédent est noté comme coupé ou non. Un arbre est noté coupé que la grume soit vidangée ou non et que la souche soit déracinée ou non.

Lorsqu'un arbre est constaté coupé à l'année n (alors qu'il était vivant à l'année $n-5$), on estime le volume qu'il représentait au moment de l'évènement (considérée à mi-période, soit à l'année $n-2,5$) à partir des informations (de volume et de production) relevées à l'année $n-5$. Le volume calculé à l'année $n-5$ est actualisé avec l'ajout de la production sur la mi-période de 5 ans. Le « prélèvement » ayant été effectué pendant la période de 5 ans (entre n et $n-5$), la somme des « prélèvements » est ensuite annualisée en divisant le volume total prélevé par 5, et correspond donc à un « prélèvement » annuel moyen.

III-2.6 Mortalité et chablis

Les arbres morts sur pied sont les arbres qui ne présentent aucun signe de vie au-dessus de 1,30 m, et qui sont toujours sur pied, cassés ou non au niveau de la tige ou du houppier. Ils sont relevés selon la même méthode que les bois vivants (placettes). Les chablis sont des arbres morts ou vivants qui ne sont plus sur pied ou avec une forte inclinaison (> 30 gr) du fait d'un accident.

III-2.7 Bilan annuel des flux et taux de prélèvement sur la période 2006-2015

Le bilan des flux permet d'apprécier l'évolution du capital de bois en forêt (et du stock de carbone dans l'écosystème) sur une période de temps.

Les flux annuels concernent les trois composantes suivantes qui font référence à la période 2006-2015 :

- La production biologique ;
- Les prélèvements ;
- La mortalité naturelle et les chablis.

Le bilan est calculé selon la formule : production biologique – prélèvements – mortalité. Il peut être négatif (décapitalisation ou source de carbone) ou positif (capitalisation ou puits de carbone).

Par extension, on calcule l'indicateur de taux de prélèvement comme le ratio entre les prélèvements et la production biologique diminuée de la mortalité.

III -3 Conversions des volumes de bois en stock de carbone dans la biomasse ligneuse

Les volumes de bois mesurés par l'IGN sont exprimés en volume aérien total, puis en biomasse aérienne et racinaire et enfin en stock de carbone et son équivalent CO₂. Par convention les flux exprimés en CO₂ équivalent font référence à l'atmosphère : leur signe est donc négatif quand la biomasse séquestre du carbone car cela revient à retrancher du CO₂ du stock de l'atmosphère.

Les conversions sont effectuées par essence, en fonction de la circonférence et de la hauteur de chaque arbre, en utilisant des tarifs de cubage du volume aérien total, des facteurs d'expansion pour estimer le volume des racines, des valeurs d'infradensité moyenne du bois pour calculer la biomasse, et un taux de carbone moyen dans la biomasse. Ces équations et coefficients moyens sont issus d'une synthèse bibliographique réalisée dans le cadre du projet CARBOFOR en 2005 (Vallet et al. 2006, Loustau (Ed.) 2010).

Il s'agit de la même méthode de calcul que celle qui est utilisée pour renseigner l'inventaire GES de la France, coordonné par le CITEPA. Cette méthode est également identique à celle de l'expertise INRA-IGN de 2017 sur le puits de carbone de la filière forêt-bois française à l'horizon 2050.

III -4 Données qualitatives utilisées en ventilation dans l'étude

Les forêts françaises sont très diverses en termes d'essences, de conditions de croissance et de niveau de prélèvement en lien avec la variabilité des climats, des conditions topographiques, de l'altitude, etc. Certaines régions françaises ont une longue histoire forestière alors que pour d'autres (Limousin, PACA, etc.) les boisements sont récents en lien avec les déprises agricoles et rurales. Il n'existe pas donc « une forêt française », mais une diversité de situation particulière. Afin de tenir compte au mieux de cette diversité, les valeurs moyennes d'inventaire sont décrites selon différents attributs :

Localisation géographique

Les coordonnées géographiques de chaque point d'inventaire étant précisément connues, les résultats d'inventaire sont disponibles selon différentes **localisations géographiques** (22 anciennes régions administratives, 13 régions administratives, grandes régions écologiques ou GRECO, domaines biogéographiques constitués par le regroupement des GRECO, bassins popuicoles à partir du regroupement de régions administratives).

Les 11 grandes régions écologiques (GRECO) métropolitaines sont constituées à partir du regroupement des 86 sylvo-éco-régions (SER). Les conditions stationnelles (sol, climat, types de peuplements forestiers) au sein d'une SER sont suffisamment différentes des autres SER.

Carte des 11 GRECO françaises



Couverture du sol

La **couverture du sol** est déterminée à partir du couvert total des arbres. S'il dépasse 40 % (où est susceptible de le dépasser quand les arbres seront à maturité) les peuplements sont des « forêts fermées ». Les peuplements dont le taux de couvert est compris entre 10 et 40 % sont des « forêts ouvertes ». Enfin, les peuplements momentanément déboisés (coupes rases), et ceux où le couvert des arbres représente moins de 10 % du couvert total de la placette sont classés dans une catégorie de composition indéterminée.

Composition en essences

La **composition du peuplement** est définie sur la placette de 20 ares (25 m de rayon). Un peuplement forestier est considéré comme étant majoritairement feuillu (ou inversement résineux) quand le couvert libre (surface représentée par les houppiers qui accède à la lumière) de toutes les essences feuillues (ou inversement résineuse) dépassent 75 % du couvert total de la placette. Dans les autres cas le peuplement est mixte. Les peupleraies sont des peuplements où les peupliers cultivés sont majoritaires dans le couvert.

IV- Présentation des livrables

IV -1 Présentation des données

Les résultats concernent deux types d'information :

- Des données de l'enquête IFN, selon différentes combinaisons de localisations géographiques, types de couverture du sol et compositions en essences :
 - Bilan moyen annuel des flux de CO₂ dans la biomasse ligneuse des forêts sur la période 2006-2015, exprimé en tonnes de CO₂ par hectare et par an.
 - Stock de carbone dans la biomasse en tonnes de carbone.
 - Chaque terme de flux (production biologique, prélèvement, mortalité) sur la période 2006-2015, exprimés en m³ de bois fort tige par an.
 - Surface statistique, en ha.
- La surface cartographiée dans la BD Forêt de l'IGN, par EPCI et par sylvo-éco-régions :
 - Peuplements majoritairement feuillus, résineux, mixtes, peupleraies, jeunes et déboisés.

- Taux de boisement (surface totale cartographiée de forêt / surface cartographiée de territoire).

Les résultats détaillés sont fournis dans deux tableaux XLS.

IV -2 Exploitation des données

Le tableau des surfaces cartographiées (source BD Forêt) permet à chaque EPCI d'identifier les SER puis les GRECO où elles se situent, puis de connaître la part des forêts feuillues / résineuses / mixtes / peupleraies qui les composent.

Les EPCI peuvent ensuite entrer dans le tableau des valeurs moyennes de flux de carbone à l'hectare, en sélectionnant les localisations géographiques, les types de couvertures boisées et les compositions en essences qui les concernent directement.

Pour un type de forêt donnée (couverture et composition) les résultats de plusieurs localisations géographiques sont disponibles. Il est recommandé de retenir les localisations les plus fines car les chiffres sont a priori plus adaptés au contexte local du territoire. Toutefois cette sélection mérite d'être expertisée au cas par cas, pour voir si les caractéristiques des forêts de l'EPCI concernée ne sont pas plus proches de celles d'une région voisine (voir chapitre 6.2 sur la validité des données globales à l'échelle locale).

Les données de composition BD Forêt et IFN ne sont pas rigoureusement identiques du fait des différences de mode d'acquisition des données (différence d'échelle et de support d'acquisition de la donnée). Les deux informations sont toutefois compatibles et elles donnent un ordre de grandeur raisonnable de la fréquence de chaque type de peuplement dans les EPCI.

V- Principaux résultats

V -1 Puits de carbone moyen à l'hectare dans la biomasse ligneuse

Au niveau national (France métropolitaine) et pour l'ensemble des couvertures boisées de production (forêts et peupleraies, quel que soit le taux de couvert) soit 15,874 millions d'ha, le puits de CO₂ dans la biomasse ligneuse s'est élevé à **-3,99 tCO₂/ha/an** au cours de la période 2006-2015. Ce chiffre atteint -4,16 tCO₂/ha/an si on ne considère que les forêts de production dont le couvert est supérieur à 10 %, soit 15,032 millions d'ha de forêts. Les peupleraies françaises (201 000 ha) sont un puits de -4,61 tCO₂/ha/an. Ces chiffres correspondent à un taux de prélèvement de 54 % de la production biologique nette.

Le puits des forêts majoritairement résineuses est de -2,38 tCO₂/ha/an (3,216 millions d'ha) ; celui des forêts feuillues hors peupleraie est de -4,60 tCO₂/ha/an (10,044 millions d'ha) et enfin celui des peuplements mixtes feuillus / résineux est de -4,88 tCO₂/ha/an (1,772 millions d'ha). Les taux de prélèvements sont respectivement de 75, 43 et 44 %.

Le stock de carbone dans la biomasse des forêts françaises est de **1 237 millions de tonnes de carbone**, correspondant à un stock de 2 646 millions de m³ (bois fort tige).

Ces chiffres varient fortement selon les domaines biogéographiques, en lien avec les dynamiques de croissance (fertilité) et de prélèvement propre à chaque zone :

Localisation géographique	SURFACE (ha)	VOLUME (m3)	STOCK_CARBONE (tC)	PRODUCTION (m3/an)	PRELEVEMENT (m3/an)	MORTALITE (m3/an)	TAUX PRELEV	BILAN_CO2 (tCO2/an)	BILAN_CO2_HA (tCO2/ha/an)
Domaine atlantique	8 728 169	1 463 712 037	687 930 262	54 063 737	27 581 579	6 295 548	58%	35 397 642	-4,06
Domaine continental	3 229 611	687 385 224	311 057 546	23 123 265	12 547 663	1 395 774	58%	14 648 297	-4,54

Domaine des hautes montagnes	1 955 699	336 107 498	147 226 808	8 259 510	1 953 259	1 680 731	30%	7 447 942	-3,81
Domaine méditerranéen	1 760 098	125 418 049	80 043 421	3 366 835	498 869	603 750	18%	4 991 572	-2,84
France	15 673 577	2 612 622 808	1 226 258 038	88 813 348	42 581 371	9 975 804	54%	62 485 453	-3,99

V -2 Coefficient de passage du m3 IFN au stock de carbone sur pied

Il est finalement possible de calculer le coefficient moyen pour passer du volume bois fort tige mesuré par l'IGN au stock de carbone aérien et racinaire dans la biomasse ligneuse. Ce coefficient s'établit à 0,47 tC/m3 en moyenne pour les forêts françaises, peupleraies incluses.

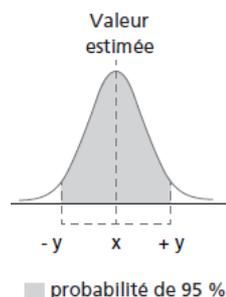
Ce chiffre moyen est contingent de l'état actuel de la ressource française. Il est donc amené à évoluer d'année en année en lien avec l'évolution de la répartition des essences feuillues et résineuses, et de leurs diamètres.

La valeur de ce coefficient n'est vraie en moyenne que pour les volumes calculés selon la définition IFN, et il convient donc de vérifier quels volumes sont utilisés en entrée.

VI- Discussion et précautions d'usages

VI -1 Des résultats statistiques assortis d'un intervalle de confiance

Les résultats issus de l'enquête IFN sont des statistiques. Ils sont assortis d'un intervalle de confiance sous la forme : $x \pm y$. Cela signifie que la valeur x estimée est comprise dans l'intervalle $[x - y ; x + y]$ avec une probabilité de 95 %, comme indiqué sur la figure suivante.



Lorsque le ratio $\frac{y}{x}$ est supérieur à 80 % (ou 30 % si x est la surface) ou que la surface du domaine associé au calcul est elle-même non significative, le résultat est alors jugé non significatif.

Les résultats de certaines compositions dans certaines anciennes régions administratives n'étaient pas significatifs (ex : forêts mixtes en Picardie). Les valeurs de bilan de CO₂ à l'ha ont été corrigées avec la valeur de la même composition dans la GRECO.

Seuls les résultats significatifs sont publiés.

VI -2 Les moyenne régionales peuvent être localement fausses

Toutes les valeurs moyennes à l'hectare sont calculées à l'échelle de vastes domaines géographiques, comme par exemple une région administrative. Si la moyenne est significative et statistiquement valide au niveau régional, elle peut masquer en réalité des situations locales hétérogènes.

Cela est inhérent à la notion de moyenne. Cette situation est très bien illustrée dans la figure suivante (extrait de Berles Klein et al. 2017) :

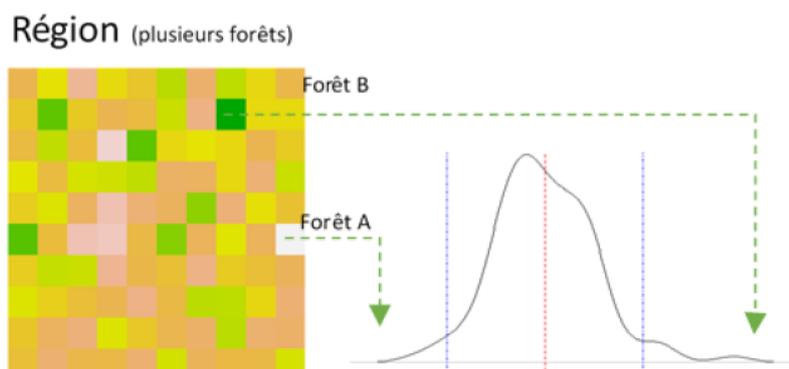


Figure 1. Schéma d'une « région » forestière avec ses forêts (chaque carré sur la partie de gauche de la figure) illustrant les valeurs d'accroissement sur une échelle de couleurs. La distribution des valeurs d'accroissement est donnée à droite, avec le lien entre la moyenne régionale (barre verticale rouge) et la valeur locale d'une « forêt ». Les barres verticales bleues illustrent l'intervalle de confiance à 95% de la distribution des valeurs.

Par exemple la moyenne calculée à l'échelle des forêts résineuses de Bretagne combine en réalité des peuplements de pins sur le littoral et dans les landes (productivité faible à moyenne) et les plantations industrielles de douglas et d'épicéa de Sitka dans l'intérieur de la Bretagne (forte productivité).

Concrètement cela signifie que l'application à une échelle infra-régionale de valeurs moyennes à l'hectare calculées à l'échelle régionale doit toujours faire l'objet d'une expertise préalable, pour vérifier sa pertinence.

VI -3 Un bilan CO₂ régional peut masquer des dynamiques locales très différentes

Le présent chapitre est une illustration du précédent.

Le bilan de CO₂ d'un territoire indique si la biomasse de son écosystème forestier, entendu ici comme la somme de tous les peuplements présents dans le territoire, s'est comporté comme un puits ou une source au cours de la période 2006-2015.

Dans le cadre conceptuel de la gestion durable, une forêt équilibrée en âge et gérée aurait un taux de prélèvement de 100 %, ce qui équivaut à un bilan de CO₂ nul. Concrètement, cela signifie que la production biologique des peuplements en croissance compense les prélèvements qui surviennent dans les peuplements arrivés à matures. Le suivi à l'échelle d'un territoire donné des flux (production biologique, prélèvements de bois, mortalité naturelle) et de leur bilan (ou leur rapport, i.e. le taux de prélèvement) sont des éléments essentiels d'appréciation de la durabilité de la gestion d'une ressource naturelle. Ces informations participent d'ailleurs aux bouquets d'indicateurs de sur la gestion durable des forêts et ils font à ce titre l'objet d'un suivi périodique de la part des décideurs aux échelles mondiales (FAO), européennes (Forest Europe) et nationales (PNFB, IGD). Dans ce cadre d'analyse conceptuel, si le taux de prélèvement d'un territoire est supérieur à 100 % sur une longue période (i.e. si le bilan de CO₂ est positif) alors la capacité de production forestière est obérée et la gestion n'est pas durable. Inversement un taux de prélèvement toujours inférieur à 100 % (i.e. un bilan de CO₂ négatif) reflète une situation de sous-exploitation chronique de la ressource, ce qui n'est pas non plus une situation durable sur le long terme.

La situation idéale d'une forêt à l'équilibre ne se rencontre jamais à l'échelle d'un territoire régional et plus encore d'un pays, car la variabilité des conditions du milieu, la survenue d'aléas naturels comme des tempêtes ou des maladies, et le régime foncier de la forêt, entraînent une grande diversité d'essences (qui ont des productivités différentes) et de niveaux d'exploitation.

Les indicateurs de bilan et de taux de prélèvement doivent donc être manipulés et interprétés avec précaution car ils ne traduisent pas la productivité intrinsèque des écosystèmes. Leurs valeurs sont en effet

conjoncturelles (datées) puisqu'elles sont largement contingentes des contextes forestiers des territoires analysés, et notamment de l'état d'équilibre ou de déséquilibre en âge et en diamètre des peuplements.

Compte tenu de la situation non stationnaire sans précédent de la forêt française (marquée par une expansion forestière séculaire et une évolution de la structure des peuplements conduisant à une capitalisation du stock sur pied), le puits de CO₂ est actuellement de -3,99 tCO₂/ha/an, et le taux de prélèvement n'est que de 55 %.

Par exemple en Occitanie les douglasaies et les pessières (essences pour lesquels les marchés porteurs) sont exploitées activement alors qu'un grand nombre de chênaies pubescentes ne le sont pas. Dans cet exemple, le bilan CO₂ actuel des peuplements résineux gérés durablement sera inférieur à celui des chênaies en libre évolution. Le puits de CO₂ conjoncturels des chênaies se réduira, voire s'annulera, avec le temps du fait du vieillissement des taillis. A contrario le puits des peuplements gérés sera stable dans le temps. De plus les peuplements gérés pourvoient les filières en produits bois pour la construction, l'industrie, l'énergie, la chimie verte, et contribuent de ce fait à l'atténuation des effets du changement climatique.

VII- Perspectives pour affiner les diagnostics forêt-carbone des territoires

L'IGN accompagne les services déconcentrés de l'Etat (DRAAF, DREAL, DDT), les Collectivités territoriales (Régions, PNR), les délégations régionales de l'ADEME, les interprofessions et les industriels en leur son expertise et ses données dans la définition et le suivi des politiques et stratégies régionales et territoriales de développement des activités autour de la forêt, du bois matériau, du bois-énergie, du carbone, de la biodiversité et de la gestion durable des territoires.

Au niveau local, l'IGN réalise depuis quelques années des prestations d'inventaires forestiers particuliers. Basés sur le protocole IFN et sur l'infrastructure de gestion de données de l'IGN, ces inventaires ad hoc permettent aux Collectivités qui les commandent d'acquérir des connaissances inédites et spécifiquement adaptées aux forêts et aux enjeux de leurs territoires, afin d'asseoir leurs stratégies de développement local.

Ce type d'inventaire concerne des territoires allant de quelques milliers à environ 100 000 ha boisé (exemples : inventaire des forêts du PNR des Boucles de la Seine en Normandie en 2017, ou de la communauté de communes du Fumélois-Montflanquinois en 2015).

Les inventaires particuliers sont entièrement paramétrables selon les contextes forestiers locaux et les enjeux de connaissance des acteurs des territoires. Le nombre de points à inventorier (toujours supérieur à celui de l'IFN, pour permettre d'améliorer la précision statistique au niveau du territoire d'étude) et leur localisation géographique est défini spécifiquement pour répondre à la demande du commanditaire. La densification de l'information levée sur le terrain permet de réduire les intervalles de confiance des variables estimées (surface, volume, ventilées par classes de diamètres, par essence,...) par rapport à ce que permettent les données de l'inventaire forestier national, et donc d'asseoir des diagnostics territoriaux fiables.

L'échantillonnage statistique de ces inventaires est défini spécifiquement pour produire une information valide à l'échelle du territoire concerné. La pression d'échantillonnage peut varier en fonction des types de peuplement d'intérêt local (par exemple si un PECL veut mieux connaître ses forêts de pins ou ses châtaigneraies). Les données prises sur le terrain dans le cadre de la réalisation de cet inventaire peuvent comporter, outre des informations dendrométriques, des informations sur l'écologie des stations (végétation, sol, etc.) et sur les habitats forestiers.

Ce type d'inventaire fournit une information précise sur le stock actuel de bois (par essences, par catégories de dimension, par qualités des bois...), sa dynamique récente (accroissement, mortalité, prélèvement), le stock de carbone et l'effet atténuation via la séquestration de carbone dans les forêts.

Ces informations permettent une planification des activités forêt-bois, avec notamment une composante économique comme l'évaluation de l'opportunité de développer une nouvelle usine ou de densifier le réseau

des pistes forestières. Ces données peuvent alimenter des outils de simulation des flux de carbone forestiers en fonction de différents scénarios de développement économique.

Toutes ces informations peuvent également alimenter des observatoires territoriaux des écosystèmes forestiers.

Bibliographie

Colin A. 2014 Emissions et absorptions de gaz à effet de serre liées au secteur forestier dans le contexte d'un accroissement possible de la récolte aux horizons 2020 et 2030. Contribution de l'IGN aux projections du puits de CO₂ dans la biomasse des forêts gérées de France métropolitaine en 2020 et 2030, selon différents scénarios d'offre de bois. Rapport final, mars 2014. Convention MEDDE.DGEC / IGN n°2200682886 (IGN n°10998). 58 p.

Dhôte J.-F., Leban J.-M., Saint-André L., Derrien D., Zhun M., Loustau D., Achat D., Roux A., Schmitt B., 2016. Leviers forestiers en termes d'atténuation pour lutter contre le changement climatique. Rapport d'étude pour le Ministère de l'agriculture, de l'agroalimentaire et de la forêt, Paris : INRADEPE, 95 p.

Dupouey J.-L. 2002. Estimation de la densité du bois pour les espèces ligneuses de la flore de France à partir d'une synthèse bibliographique. Rapport d'étude. Novembre 2002. 11 pages.

Hervé J.-C., Wurpillot S., Vidal C., Roman-Amat B. 2014. L'inventaire des ressources forestières en France : un nouveau regard sur des nouvelles forêts. Rev. For. Fr. LXVI - 3-2014 - © AgroParisTech, 2014. pp. 247-260

IGN, 2016. La forêt en chiffres et en cartes (memento 2016). 17 p.

Loustau D. éditeur 2004. Séquestration de Carbone dans les grands écosystèmes forestiers en France. Quantification, spatialisation, vulnérabilité et impacts de différents scénarios climatiques et sylvicoles. Rapport Final Projet GICC 2001 "Gestion des impacts du changement climatique" et Convention Gip ECOFOR n°3/2001. INRA, Bordeaux - Pierroton, France. 137 p.

Loustau D. editor 2010. Forests, carbon cycle and climate change. Ouvrage collectif issu du projet CARBOFOR, Editions 615 QUAE, Versailles, collection Update Sciences and Technologies. ISBN: 9782759203840. 348 p.

Peyron J.-L., Hervé J.-C. 2013. Comment évaluer le niveau d'exploitation des ressources forestières françaises ? Revue Forestière Française LXIV – 5-2012 – pp. 599-611.

Roux A., Dhôte J.-F. (Coordinateurs), Achat D., Bastick C., Colin A., Bailly A., Bastien J.-C., Berthelot A., Bréda N., Caurla S., Carnus J.-M., Gardiner B., Jactel H., Leban J.-M., Lobianco A., Loustau D., Meredieu C., Marçais B., Martel S., Moisy C., Pâques L., Picart-Deshors D., Rigolot E., Saint-André L., Schmitt B. (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, 101 p. + 230 p. (annexes).

Vallet P. et al. 2006. Development of total aboveground volume equations for seven important forest tree species in France. Forest Ecology and Management vol. 229, no1-3, pp. 98-110.