



INSTITUT NATIONAL
DE L'INFORMATION
GÉOGRAPHIQUE
ET FORESTIÈRE



Août 2024

Plan d'approvisionnement territorial de Caen Normandie Métropole

Ressource et disponibilités forestières

Rapport d'étude

VERSION 1.0

SOMMAIRE

0- CONTEXTE ET OBJECTIFS DE L'ETUDE	3
I- CREATION DE STRATES CARTOGRAPHIQUES	5
I-1 DONNEES CARTOGRAPHIQUES ET DOMAINE D'ETUDE	5
I-2 LES MODELES NUMERIQUES POUR LA HAUTEUR DE VEGETATION	5
I-3 METHODE DE CREATION DES STRATES CARTOGRAPHIQUES	6
I-4 UTILISATION DES STRATES CARTOGRAPHIQUES	6
II- DONNEES D'INVENTAIRE ET CALCULS DENDROMETRIQUES	8
II-1 INVENTAIRE A FAÇON	8
II-2 ESTIMATION DE LA SURFACE	9
II-3 VARIABLES DENDROMETRIQUES ESTIMEES	10
II-4 INTERVALLE DE CONFIANCE	11
III- METHODE DE PROJECTION DU STOCK DE BOIS, DU POTENTIEL DE RECOLTE ET DU CARBONE FORESTIER	12
III-1 DOMAINES D'ETUDES	12
III-2 SIMULATEUR DE L'EVOLUTION DE LA RESSOURCE	13
III-3 SCENARIO DE GESTION	14
III-4 RECOLTE POTENTIELLE ET BILAN CARBONE	15
IV- RESULTATS SUR LA RESSOURCE FORESTIERE ACTUELLE	18
IV-1 INDICATEURS AU NIVEAU DU TERRITOIRE	18
IV-2 ANALYSE DE L'EVOLUTION HISTORIQUE	19
IV-3 REPARTITION DU CAPITAL SUR PIED	20
V- RESULTATS DE LA PROJECTION A L'HORIZON 2040	21
V-1 VOLUMES DE RECOLTE POTENTIELLE	21
V-2 LOCALISATION DE LA RECOLTE POTENTIELLE	22
V-3 EVOLUTION DU STOCK DE BOIS SUR PIED	24
V-4 BILAN CARBONE PROJETE	25
VI- ANNEXES	27
ANNEXE 1 – LOCALISATION DES POINTS D'INVENTAIRE PAR STRATE CARTOGRAPHIQUE	27
ANNEXE 2 – ITINERAIRES SYLVICOLES ET DOMAINES D'ETUDE	28
ANNEXE 3 – PRINCIPAUX RESULTATS PAR STRATE CARTOGRAPHIQUE	32
ANNEXE 4 – PRINCIPAUX RESULTATS PAR DOMAINE D'ETUDE	34

SUIVI DU DOCUMENT

Date	Version	Auteur	Action	Organisme
23/08/2024	1.0	DASSOT Mathieu	Rédaction	IGN Nancy

0- Contexte et objectifs de l'étude

Ce rapport a été rédigé dans le cadre de la réalisation d'un Plan d'Approvisionnement Territorial (PAT) sur le territoire du Pôle métropolitain Caen Normandie Métropole (CNM), situé dans le département du Calvados (figure 1). Le PAT a pour objectif d'apporter aux élus des informations chiffrées afin d'aider au développement de l'approvisionnement en bois d'unités installées sur le territoire (éléments sur la ressource exploitable, les volumes de bois disponibles, la consommation, les coûts de mobilisation, etc.). Dans le cadre de cette étude, le PAT a été réalisé grâce au partenariat entre les Communes Forestières (COFOR) de Normandie et l'IGN.

Le territoire du Pôle métropolitain Caen Normandie Métropole couvre plus de 1 600 km². A de telles échelles, des méthodes particulières d'évaluation de la ressource doivent être mises en place. En effet, les inventaires de gestion (issus des aménagements et des plans simples de gestion) sont loin d'être exhaustifs, ne renseignant que sur une partie des propriétés et sur les peuplements d'intérêts économiques et mobilisables à court terme. L'inventaire forestier national (IFN) fournit des informations pour répondre à des problématiques forestières au niveau national ou régional, mais pas à l'échelle de ce type de territoire. L'enjeu du travail de partenariat COFOR-IGN est d'utiliser une approche technique permettant d'obtenir les résultats les plus robustes possibles à cette échelle, en récoltant les données nécessaires tout en valorisant au maximum celles déjà disponibles.

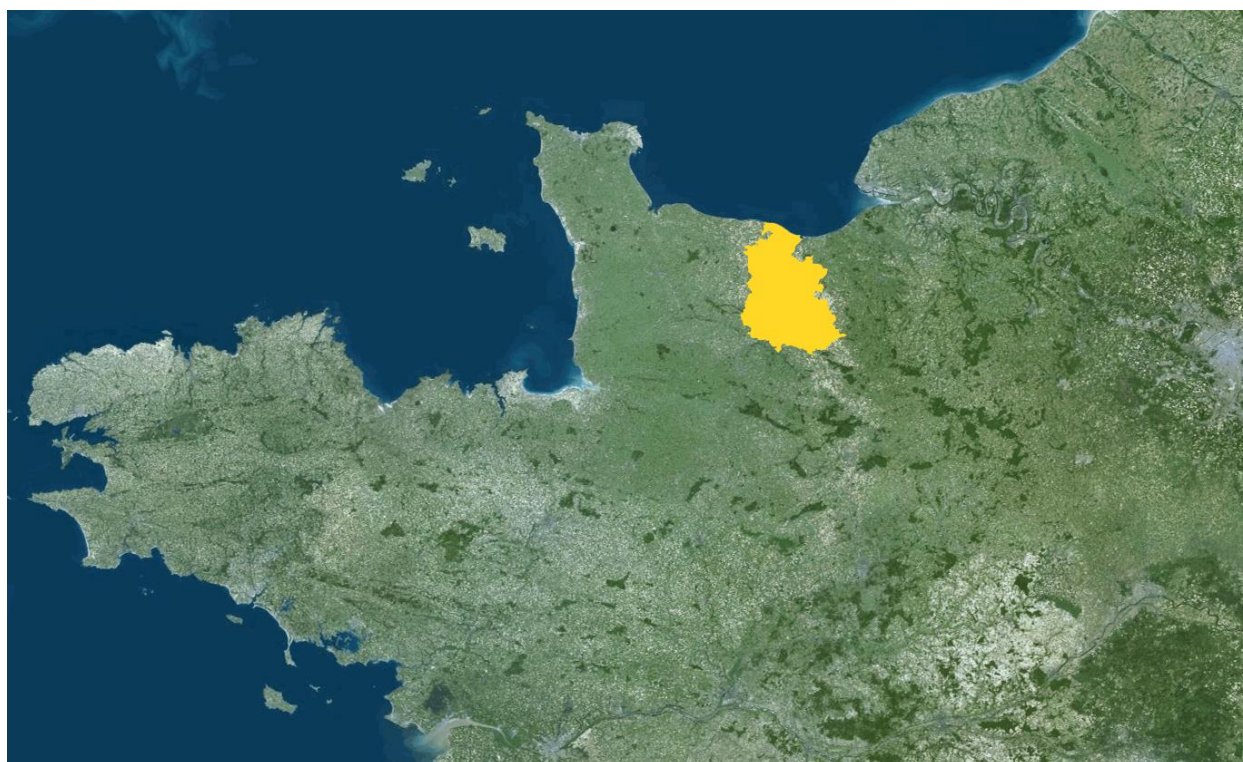


Figure 1 : Localisation du territoire d'étude (source : IGN, 2023)

Ce document vise à présenter la méthode et les résultats de l'évaluation de la ressource forestière actuelle du territoire ainsi que de la projection de la récolte et du bilan carbone potentiel de l'activité forêt-bois sur les 20 ans à venir. Les éléments sur la demande et la consommation de bois du territoire, ainsi que les coûts et les conditions de mobilisation font l'objet de travaux réalisés par les COFOR de Normandie (figure 2) et ne sont pas présentés ici.

Les résultats produits sont à la fois statistiques (stocks de bois sur pied, volumes disponibles, etc.) et cartographiques (répartition des volumes, etc.). Les paragraphes suivants détaillent cette méthode, résument les principaux résultats et précisent leurs précautions d'usage.

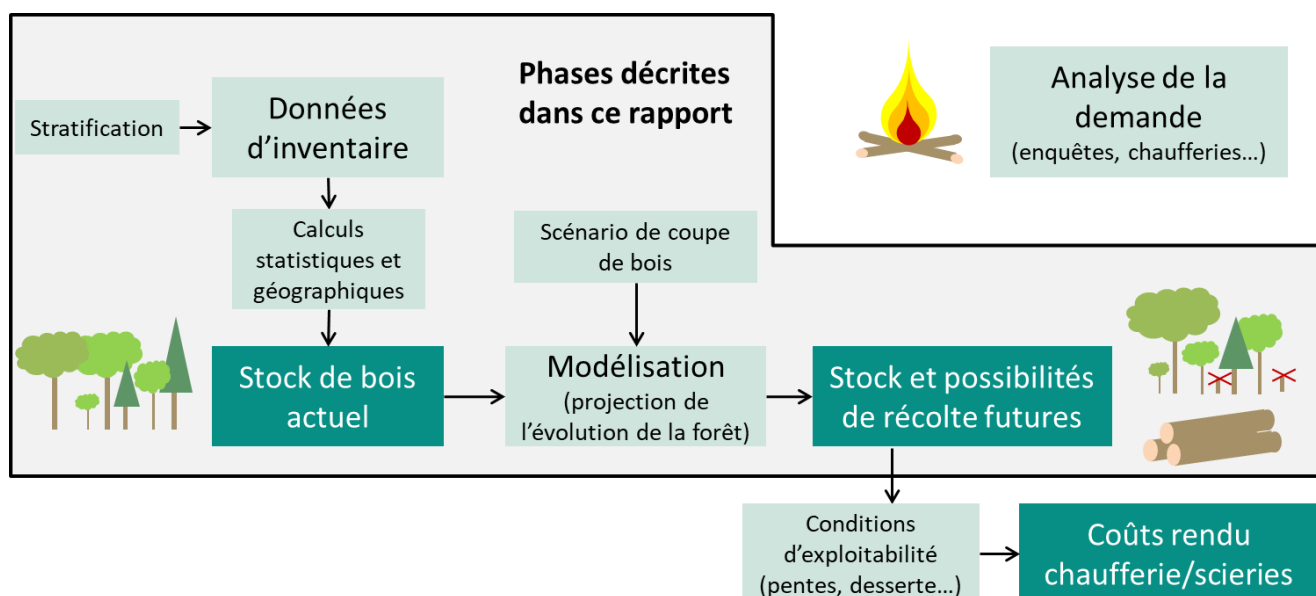


Figure 2 : Schéma synthétique de la méthode employée dans le PAT

Les trois premières parties sont consacrées à la présentation de la méthode appliquée pour le calcul des stocks actuels et futurs, ainsi que les précautions d'usage qui en découlent :

- I- la partition du territoire (via des données géographiques telles que la BD Forêt® et le modèle numérique de hauteur des peuplements) en différentes strates forestières cartographiques utilisées pour déterminer les données d'inventaire à acquérir et pour spatialiser les résultats ;
- II- la collecte et l'homogénéisation de données dendrométriques (via notamment un inventaire terrain spécifique) pour estimer la ressource actuelle ;
- III- la définition d'hypothèses de gestion par type de peuplement afin de projeter la ressource forestière (via l'outil de simulation MARGOT) et l'évolution du potentiel de récolte et du bilan carbone dans les 20 ans à venir sur le territoire.

Les deux dernières parties regroupent les principaux résultats statistiques et cartographiques, qui sont dérivés du livrable « G_Forêt » (couche géographique « shape » des résultats par pixel d'un hectare) :

- IV- les résultats sur la ressource actuelle, issues de la compilation et du traitement des données d'inventaire et de la spatialisation via les strates cartographiques ;
- V- les résultats en termes d'évolution du stock sur pied, de récolte potentielle et de bilan carbone projetés à un horizon de 20 ans.

I- Création de strates cartographiques

La création de strates cartographiques, notamment à l'aide de la BD Forêt® de l'IGN et du modèle numérique de hauteur, répond à deux objectifs :

- identifier les peuplements forestiers d'intérêt pour le PAT (selon l'enjeu de production, le niveau de connaissance actuel des peuplements et les données disponibles pour les caractériser) ;
- cartographier le contour des différents types de peuplements et fournir une représentation spatiale des forêts du territoire.

I-1 Données cartographiques et domaine d'étude

La carte forestière BD Forêt® v.2 est réalisée par photo-interprétation des peuplements forestiers sur des prises de vues aériennes datant de 2009 pour le département du Calvados (<https://inventaire-forestier.ign.fr/spip.php?article646>). Elle fournit des informations à la fois sur le contour des massifs forestiers à partir de 0,5 ha mais également sur les essences ou mélanges d'essences présents. Cette couche géographique a été utilisée dans le cadre de ce PAT afin de définir le « masque forestier », c'est-à-dire les limites des forêts du territoire qui servent de zone d'étude exacte (tout ce qui est en dehors de ces limites n'est pas étudié). Les landes (couvert boisé inférieur à 10 % ou hauteur à maturité *in situ* inférieure à 5 m) identifiées dans la BD Forêt® ont été exclues de ce masque. La BD Forêt® ne cartographiant les boisements qu'à partir de 20 m de large, les haies ne sont pas non plus incluses dans le masque.

Cette information sur les contours des peuplements ainsi que leurs essences a été affinée par croisement avec d'autres couches géographiques spécifiques, de manière à exclure du masque de la BD Forêt® les zones n'ayant clairement plus ou pas d'usage de production de bois. Elles ont été regroupées dans une strate « Hors PAT » non étudiée par la suite. Il s'agit par exemple des zones protégées ayant le statut de réserve naturelle nationale (RNN du coteau de Mesnil Soleil) ou d'arrêtés préfectoraux de protection de biotope (APPB de la basse vallée de la Seulle, APPB du bassin hydrographique du ruisseau du Vingt Bec).

Afin de différencier les forêts du territoire selon leur type de propriété, la version 2023 de la couche des forêts publiques de l'ONF a également été exploitée (http://carmen.carmencarto.fr/105/ONF_Forets.map).

I-2 Les modèles numériques pour la hauteur de végétation

A partir de données LiDAR ou de photos aériennes, l'IGN produit un modèle numérique de terrain (MNT = altitude du sol) nommé RGE Alti, d'une résolution de 1 m, ainsi qu'un modèle numérique de surface (MNS = altitude du sursol), d'une résolution de 25 cm. En faisant la différence entre ces deux données, il est possible de déduire un modèle numérique de hauteur (MNH) correspondant à la hauteur de la végétation (figure 3). La qualité et la précision de cette hauteur dépendent notamment de la source d'obtention du MNT (bonne précision pour les données LiDAR, moins bonne pour la corrélation photographique). Sur le territoire du pôle CNM, le MNT est majoritairement issu de corrélations photographiques (74 %). Le MNS est quant à lui issu de photos aériennes datant de 2020 pour le département du Calvados et représente un état assez récent de la forêt.

Le traitement du MNH a consisté à calculer des classes de hauteurs dominantes des peuplements d'une amplitude d'environ 5 m sur des pixels d'un hectare. Le volume à l'hectare étant très fortement corrélé à la hauteur dominante, l'information de hauteur issue du MNH combinée aux autres informations cartographiques (BD Forêt®, types de propriété, etc.) permet de regrouper en strates cartographiques des peuplements semblables en niveau de capital à l'hectare.



Figure 3 : Méthode d'obtention du modèle numérique de hauteur (MNH). Dans cet exemple, plus la teinte est foncée et plus le peuplement est haut.

I-3 Méthode de création des strates cartographiques

Ces différentes informations cartographiques ont été croisées entre elles, puis associées aux données de l'inventaire forestier national (IFN) récentes disponibles sur un territoire présentant des conditions écologiques semblables à celles du territoire du pôle CNM (mêmes sylvoécორégions¹ que le territoire du pôle CNM). Au total, 408 placettes IFN des campagnes 2013 à 2021 sur les sylvoécორégions A13 et B31 du département du Calvados ont été mobilisées. Ce croisement entre IFN et données cartographiques permet d'étudier le lien entre différentes variables dendrométriques mesurées sur ces placettes IFN (le volume à l'hectare, la production, le diamètre moyen, la part de feuillus et la part de bois d'œuvre) et les variables cartographiques (essence photo-interprétée de la BD Forêt®, type de propriété et classe de hauteur dominante du MNH). Cette analyse a pour but de sélectionner les critères géographiques et de créer les strates cartographiques les plus adaptées à la phase d'inventaire et à la spatialisation des résultats.

Les strates sont des types de peuplements spatialement explicites, issus de la combinaison des variables cartographiques (essence x classe de hauteur x type de propriété), qui seront spécifiquement décrits par des données d'inventaire. Les strates doivent répondre aux trois conditions suivantes : couvrir une surface suffisante (pour être représentatives), présenter une faible variabilité interne (une strate devant représenter un peuplement homogène) et présenter de fortes variabilités les unes avec les autres (l'ensemble des strates devant représenter la diversité des peuplements). Des outils statistiques, tels que des analyses de variance, des ACP et la classification ascendante hiérarchique ont été utilisés afin de déterminer les meilleures stratifications possibles.

I-4 Utilisation des strates cartographiques

Sept strates cartographiques d'intérêt ont ainsi été définies pour répondre aux deux objectifs cités précédemment : déterminer les données nécessaires à acquérir en inventaire sur le terrain et spatialiser les résultats de ressource.

Le premier objectif des strates est d'identifier les peuplements d'intérêt ainsi que les données nécessaires pour les caractériser. Un niveau de capital et une hétérogénéité probables ont été estimés pour chaque strate à l'aide des points IFN déjà mobilisés pour optimiser la stratification. Parallèlement, les strates ont été caractérisées selon leur enjeu de production pour le PAT et le niveau de connaissance à atteindre. A partir de l'hétérogénéité attendue, de la surface concernée et de l'enjeu de connaissance de la ressource pour chacune des strates, les besoins en données ont pu être précisés (table 1). Cela a notamment permis de

¹ IFN 2011. Une nouvelle partition écologique et forestière du territoire métropolitain : les sylvoécორégions (SER). L'IF n°26. Edition IFN. ISSN : 1769-6755. 8p.

calculer un nombre de points d'inventaire cible par strate pour atteindre la précision voulue et de définir finement le plan d'échantillonnage de l'inventaire à façon. Cette étape a été réalisée en discussion avec les membres du territoire du pôle CNM, les COFOR Normandie, l'ONF, le CRPF et l'association Fibois.

STRATE CARTOGRAPHIQUE	D'APRES LES POINTS IFN			OBJECTIFS POUR LE PAT		
	Volume moyen (m3/ha)	Diamètre moyen (cm)	Hétérogénéité	Enjeu pour le PAT (erreur acceptable de l'inventaire à façon)	Surface (ha)	Nombre de points cible pour l'inventaire à façon
FEU_CHE_0-Inf_TOT : peuplements purs de chêne, toutes hauteurs	193,8	35,4	Moyenne	Fort (22%)	1 840	22
FEU_TOT_0-12_TOT : peuplements de feuillus mélangés de hauteur moyenne < 12 m	58,0	16,1	Très forte	Moyen (39%)	2 650	22
FEU_TOT_12-15_TOT : peuplements de feuillus mélangés de hauteur moyenne comprise entre 12 et 15 m	142,2	23,1	Forte	Moyen (33%)	3 050	20
FEU_TOT_15-18_TOT : peuplements de feuillus mélangés de hauteur moyenne comprise entre 15 et 18 m	184,6	23,1	Moyenne	Fort (22%)	3 260	21
FEU_TOT_18-Inf_TOT : peuplements de feuillus mélangés de hauteur moyenne > 18 m	276,5	31,4	Moyenne	Fort (21%)	2 980	21
MIX_TOT_0-Inf_TOT : peuplements mélangés feuillus-résineux, toutes hauteurs	192,5	26,3	Forte	Fort (29%)	990	24
RES_TOT_0-Inf_TOT : peuplements de résineux, toutes hauteurs	276,7	32,7	Moyenne	Fort (25%)	1 080	20
Peupleraie	Exclue de l'inventaire du PAT (400 ha)					
HORPAT : forêts hors PAT (zones protégées ou urbanisées)	Non étudié dans la suite du PAT (1 090 ha)					

Table 1 : Table des strates cartographiques, de leurs caractéristiques et du nombre de points d'inventaire à réaliser pour atteindre l'objectif de précision (§ I.1 et § II.2).*

Les sept strates à enjeu ont été inventoriées via un inventaire à façon (§ II-1). Une cartographie de ces strates et des points d'inventaires réalisés pour chacune d'entre elle est disponible en [annexe 1](#).

Le second objectif de ces strates consiste à spatialiser les résultats de ressource sur le territoire. Cette utilisation est possible après calcul des résultats statistiques. Un volume moyen est alors calculé par strate, puis associé à chaque pixel d'un hectare selon son attribut de strate cartographique. Cela permet une spatialisation de la ressource mais ne représente aucunement une prédiction locale du volume, son utilisation étant limitée à la visualisation de grandes tendances de capitalisation entre massifs forestiers.

II- Données d'inventaire et calculs dendrométriques

Afin de connaître la ressource forestière actuelle du territoire, des données dendrométriques ont été récupérées lors d'un inventaire à façon, puis traitées via les estimateurs et les définitions de l'inventaire forestier national. Ces traitements, standardisés, permettent d'adopter un langage commun, d'homogénéiser et de comparer ces résultats avec les estimations régionales et nationales ainsi que les estimations historiques.

II -1 Inventaire à façon

Les strates à enjeu ont été inventoriées via un inventaire « à façon ». Son plan d'échantillonnage a été conçu spécifiquement, suivant une grille systématique et aléatoire et avec une pression d'inventaire modulée suivant les strates (§ I-4).

L'inventaire des placettes du PAT a été effectué par le CNPF Hauts-de-France-Normandie entre octobre 2023 et avril 2024. Certaines placettes n'ont pas pu être visitées suite au refus des propriétaires de réaliser des mesures dans leurs parcelles. Ces points ont été exclus de l'échantillon, a priori sans risque de biais des résultats (ces forêts n'étant normalement pas différentes des autres). Au total, l'échantillon contient 128 placettes forestières de production, dont 124 ont pu donner lieu à un relevé dendrométrique d'arbres recensables.

Le protocole de cet inventaire à façon est directement issu du protocole IFN. Il a cependant été très largement simplifié afin d'alléger le temps de collecte (et ainsi mesurer plus de points par jour) et de répondre aux enjeux particuliers du PAT. Ces points se composent à la fois d'une description du peuplement, et d'un relevé dendrométrique (figure 4). Les arbres de plus de 7,5 cm de diamètre sont mesurés sur des placettes imbriquées de 6, 9 et 15 m de rayon, en fonction de leur diamètre. Un spécialiste de l'inventaire forestier de la direction territoriale Grand-Ouest de l'IGN a formé et accompagné le prestataire dans l'utilisation du protocole.

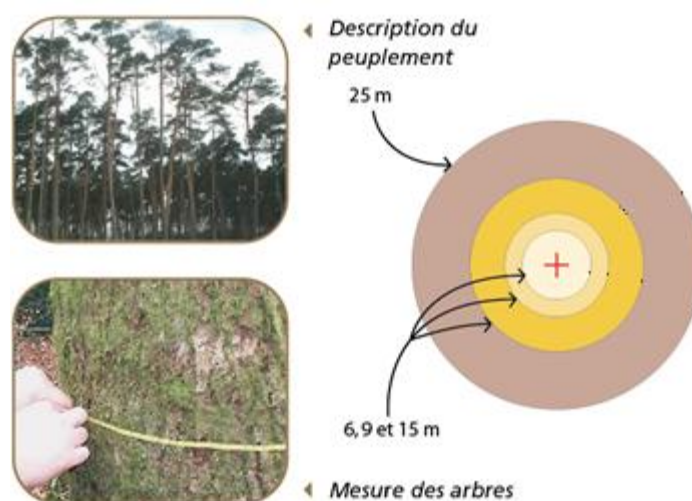


Figure 4 : Observations et mesures sur les placettes (Source : IGN)

Les volumes de bois sur pied et les productions biologiques ont été estimés à partir des données mesurées directement sur les placettes du PAT, des tarifs de cubage déjà disponibles à l'IGN et de données complémentaires imputées par l'IGN grâce à la richesse de ses bases de données historiques d'inventaire.

L'utilisation *a posteriori* de la chaîne de traitement statistique des données de l'IFN a permis de calculer des résultats à l'échelle du PAT équivalents à ceux publiés en routine par l'IFN.

II -2 Estimation de la surface

Seules les forêts dites « disponibles pour la production de bois » des strates à enjeu ont été considérées dans cette étude. L'estimation de la surface est issue d'un calcul statistique permettant de comptabiliser uniquement ces forêts « disponibles », et n'est donc pas équivalente à une surface cartographique des strates telle que l'on pourrait l'obtenir via un système d'information géographique.

En termes d'occupation du sol, ces forêts entrent dans le périmètre de la définition internationale fixée par la FAO, spécifications aussi reprises dans la BD Forêt. Ce sont les forêts ayant une superficie de plus de 50 ares, une largeur supérieure ou égale à 20 m (n'inclut donc ni les bosquets, ni les haies) et un taux de couvert absolu des arbres au moins égal à 10 % (n'inclut donc pas les landes). De plus les arbres doivent pouvoir atteindre 5 m de hauteur à maturité.

En termes d'usage du sol, la production de bois doit être possible, c'est-à-dire qu'il ne doit pas y avoir d'autre utilisation ou de contrainte physique empêchant l'exploitation (réserve biologique intégrale, élevage clos, falaises, parc urbain, etc.). Cela ne signifie pas pour autant que toutes ces forêts sont réellement mises en production, mais seulement qu'elles pourraient éventuellement l'être ou le devenir. Cette information n'est pas contenue dans la BD Forêt mais le croisement avec d'autres couches géographiques (§ I-1) peut fournir une première indication (figure 5). Cependant, il peut y avoir des différences entre la saisie sur photo et la caractérisation sur le terrain. C'est la caractérisation de la couverture et de l'usage du sol sur le terrain qui fait foi.

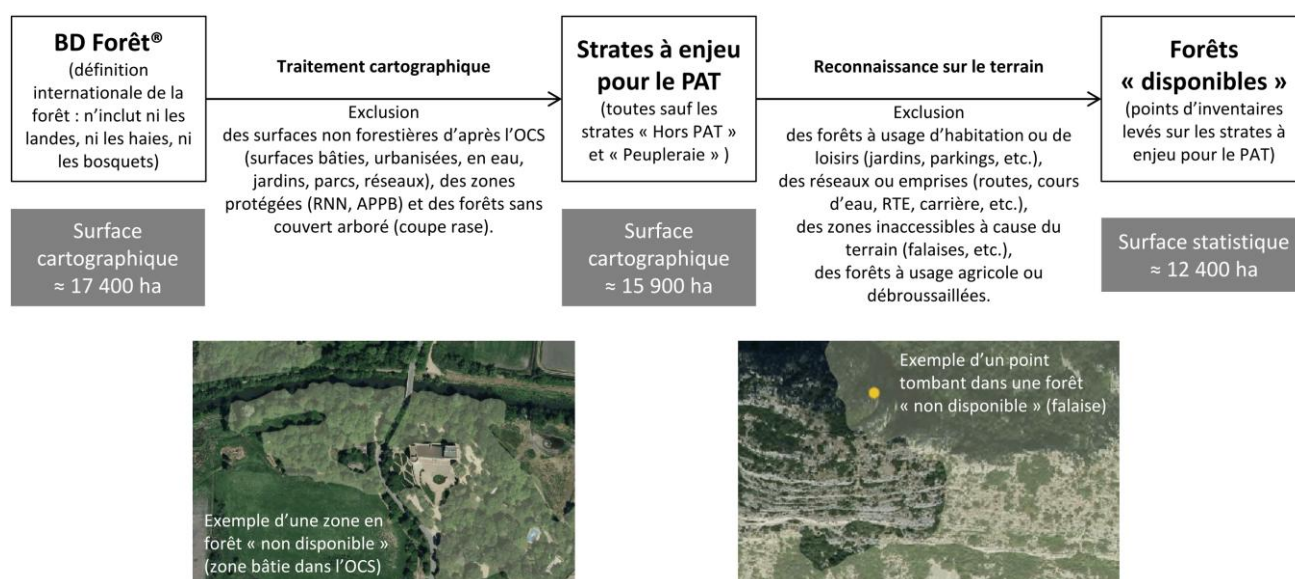


Figure 5 : Forêts étudiées dans le PAT et estimation de leur surface statistique

Les surfaces calculées dans le cadre de cette étude (§ IV-1) ne sont donc pas directement les surfaces cartographiées des strates mais bien des estimations statistiques. Ces estimations sont issues de l'échantillonnage représentatif des forêts du territoire d'étude (qui donne une surface de pondération à chaque point d'inventaire) et des relevés effectués sur le terrain (qui confirment ou infirment le caractère forestier de chaque point inventorié, ce qui donne finalement une information sur la fréquence des forêts dans l'échantillon). Les surfaces statistiques sont inférieures aux surfaces cartographiques (figure 5).

Il existe aussi une part (très faible) de forêt disponible pour la production en dehors des strates étudiées (liée à des évolutions du territoire depuis la photo-interprétation, à des différences entre la photo et la réalité de terrain en lisière de peuplement ou à la difficulté d'appréciation sur photo du seuil de couvert entre lande et forêt). Ces zones non cartographiées n'étant pas incluses dans les strates étudiées (§ I-1), aucune statistique ne peut y être produite.

C'est cette estimation de la surface statistique sur les strates étudiées du PAT (12 400 ha) qui est utilisée pour connaître le total des volumes ou de la production sur l'ensemble de l'étude.

II -3 Variables dendrométriques estimées

Les données dendrométriques issues des inventaires ont été utilisées pour calculer des résultats en volume, carbone, production et diamètre selon les définitions ci-dessous (figure 6) :

Volume bois fort tige : il s'agit du volume sur écorce du tronc depuis le sol jusqu'à la découpe fin bout de 7 cm, incluant une seule branche maîtresse. Il concerne les arbres de plus de 7,5 cm de diamètre. La hauteur des arbres n'étant pas mesurée dans l'inventaire à façon, les tarifs de cubage utilisés sont des tarifs « IFN » à une entrée (diamètre) développés par essence et avec différentes variables explicatives.

Volume aérien total : il s'agit du volume de l'arbre entier, toutes les branches comprises mais sans les racines. Ce volume a été calculé à partir du volume bois fort tige des arbres de l'inventaire à façon, en utilisant des coefficients d'expansion² par essence et catégorie de diamètre.

Volume bois fort total : il s'agit du volume de la tige principale et de toutes les branches jusqu'à la découpe de 7 cm de diamètre. Ce volume a été estimé en soustrayant un volume de menus bois (branches < 7 cm de diamètre) au volume aérien total.

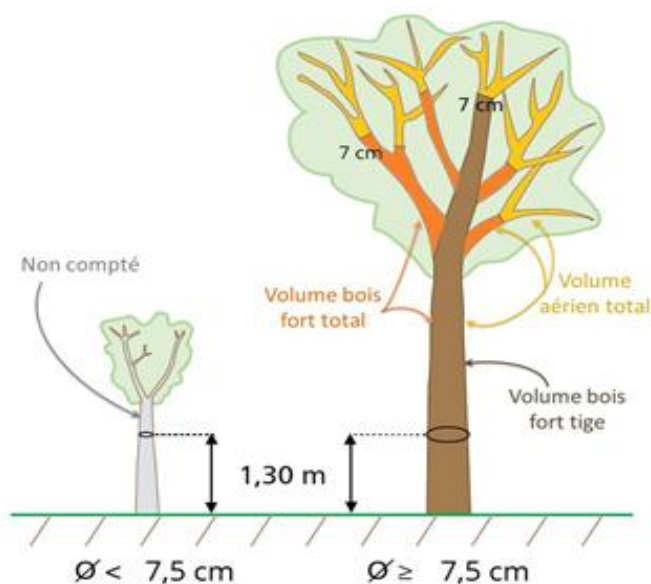


Figure 6 : Les différents volumes de l'arbre

² 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, n°1-3, pp. 98-110.

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

Stock de carbone dans le bois : le volume aérien total est converti en stock de carbone dans l'arbre par l'application de différents coefficients² (un facteur d'expansion racinaire et une infradensité moyenne variables suivant les essences pour passer en biomasse aérienne et racinaire, puis un taux de carbone dans la biomasse de 0,475 pour passer en carbone). Ces stocks servent notamment au calcul du bilan carbone projeté (§ III-4).

Production : la production calculée ici est une production nette (production brute moins la mortalité) :

- La production brute est l'augmentation moyenne annuelle du volume de bois sur écorce et est connue grâce au volume d'arbres recrutés et à l'accroissement radial des arbres au cours des cinq dernières années. L'accroissement radial n'étant pas mesuré dans l'inventaire à façon, il a été imputé à partir des données IFN (où l'accroissement est mesuré par sondage) en faisant le lien entre des arbres d'essences et de diamètres identiques et poussant dans des conditions de croissance semblables (hauteur dominante du peuplement reflétant des conditions de fertilité et statut dominant ou dominé de l'arbre reflétant son accès à la lumière).
- Le flux de mortalité est connu sur les placettes de l'inventaire à façon grâce à l'observation des arbres morts dans les 5 ans précédant la mesure.

Comme pour le volume, la production a été calculée pour les différents compartiments de l'arbre (bois fort tige, bois fort total et aérien total).

Diamètre moyen : il s'agit du diamètre quadratique moyen, c'est-à-dire du diamètre de l'arbre de surface terrière moyenne dans le peuplement. Sa valeur dépend du fait que les tiges sont comptabilisées à partir de 7,5 cm de diamètre, et n'est pas forcément comparable à d'autres sources de données.

II -4 Intervalle de confiance

Les résultats de ces variables 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 %. Cet intervalle de confiance prend à la fois en compte l'incertitude sur la surface forestière et l'hétérogénéité de la variable dendrométrique au sein de l'échantillon. Cet intervalle de confiance n'est toutefois pas complètement comparable à celui des résultats IFN compte-tenu, entre autres, de la différence liée à la zone d'étude (« masque forestier » des strates à enjeu dans le cas du PAT, ensemble du territoire pour l'IFN).

III- Méthode de projection du stock de bois, du potentiel de récolte et du carbone forestier

Le calcul de l'évolution de la ressource et des volumes potentiellement récoltables à un horizon de 20 ans consiste en un travail de projection, qui fait évoluer la ressource forestière actuelle selon des dynamiques naturelles et des scénarios de gestion. Cette projection est effectuée selon la méthode schématisée à la figure 7 et précisée dans les paragraphes suivants.

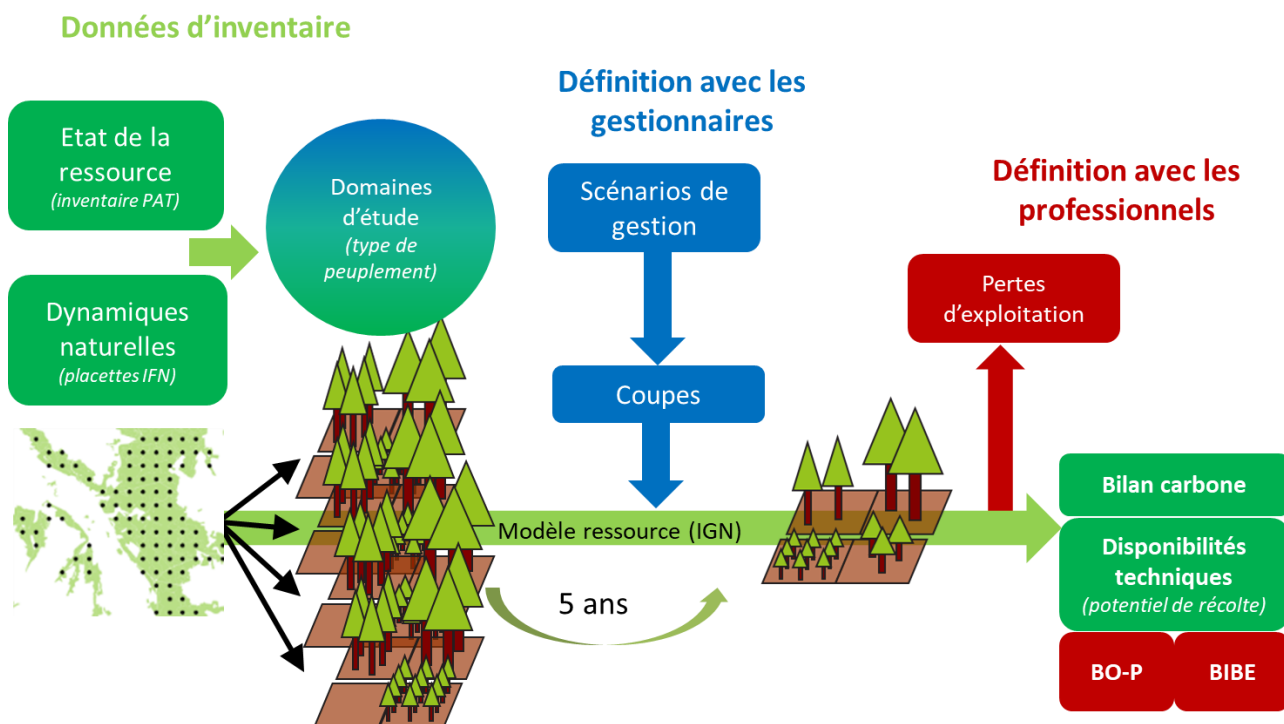


Figure 7 : Schéma synthétique de la méthode de projection de la ressource et de calcul des disponibilités.

III -1 Domaines d'études

Les projections de la ressource sont effectuées par domaine d'étude. Un domaine d'étude regroupe des peuplements aux caractéristiques semblables (essence, propriété, conditions de milieu, sylviculture) qui peuvent donc suivre les mêmes conditions de croissance biologique, de mortalité et de prélèvement pour un stade de développement donné.

Ces domaines d'étude sont différents par leur nature et leur objectif des strates cartographiques décrites précédemment. Alors que les strates cartographiques sont définies à partir de données géographiques permettant l'échantillonnage de l'inventaire et la spatialisation des résultats, les domaines d'étude sont quant à eux définis à partir de critères observés sur le terrain et permettent de projeter l'évolution de la ressource. Les différences entre strates cartographiques et domaines d'étude ont deux origines. D'une part, les données « terrain » étant plus riches et plus précises que les données géographiques, leur utilisation pour définir les domaines d'étude permet de mieux approcher et décrire le peuplement réel, sa croissance et sa sylviculture (en revanche, elles ne peuvent pas être spatialisées). D'autre part, les domaines d'étude visent à regrouper des peuplements suivant la même dynamique, pour lesquels différents stades de maturité et niveaux de capital sont représentés (alors que les strates cartographiques visent justement à les différencier). Par exemple, il est pertinent de séparer en strates les résineux de hauteur faible ou forte pour la spatialisation car

le capital à l'hectare est différent. Mais pour la projection, il est plus pertinent de distinguer les résineux selon leurs essences pour lesquelles la gestion ne sera pas la même.

Sept domaines d'études (table 2) ont été constitués sur le territoire du PAT selon l'essence principale du peuplement.

DOMAINE D'ÉTUDE	Critères de définition	Nombre de points PAT (état ressource)	Nombre de points IFN (dynamiques naturelles, SER)	Surface (% zone d'étude)	Volume moyen (m3/ha)
Chêne pédonculé	Chênaies (essence principale)	30	66	3 140 ha (25 %)	197 m3/ha
Chêne sessile	Chênaies (essence principale)	18	89	2 030 ha (16 %)	251 m3/ha
Hêtre	Hêtraies (essence principale)	12	49	1 430 ha (11 %)	213 m3/ha
Frêne	Frênaies (essence principale)	12	39	1 400 ha (11 %)	181 m3/ha
Autres feuillus	Peuplements d'autres feuillus (essences principales), dont bouleau et érable	21	79	2 460 ha (20 %)	144 m3/ha
Pins	Pineraies (essence principale)	22	19	1 220ha (10 %)	235 m3/ha
Autres résineux	Peuplements d'autres résineux (essences principales), dont douglas et épicéa	13	55	765 ha (6 %)	340 m3/ha

Table 2 : Table des domaines d'étude, de leurs caractéristiques et du nombre de points concernés.

III -2 Simulateur de l'évolution de la ressource

Les projections sont effectuées avec un simulateur décrivant l'évolution de la ressource forestière et développé à l'IGN depuis la fin des années 1980. Le simulateur comprend un modèle démographique matriciel de dynamique de la ressource par classe de diamètre qui simule la croissance, la mortalité et la sylviculture à l'échelle des domaines d'étude selon des pas de 5 ans³.

Ce modèle est : 1) statistique et empirique, c'est-à-dire qu'il se base exclusivement sur les mesures et observations réalisées sur les placettes d'inventaire ; 2) générique, c'est-à-dire qu'il est paramétrable et applicable quel que soit le type de peuplement (à l'inverse des modèles spécifiques qui ne peuvent être utilisés que pour une situation donnée et, le plus souvent, pour une seule essence). En revanche, il ne tient pas compte d'aléas exceptionnels (tempêtes, incendies, maladies) qui pourraient survenir à l'horizon de 20 ans, ni des effets du changement climatique, ni des effets liés à la densité des arbres. Les paramètres de croissance et de mortalité sont stationnaires sur la période de projection. Dans le contexte de la temporalité forestière marquée par des évolutions lentes et progressives, ce type de modèle statistique est considéré comme suffisamment robuste en projection à court et moyen terme, comme c'est le cas dans la présente étude.

³ Wernsdörfer H. et al. 2012. Large-scale dynamics of a heterogeneous forest resource are driven jointly by geographically varying growth conditions, tree species composition and stand structure. *Annals of Forest Science* 69, 829-844.

La description de la ressource par classe de diamètre est adaptée dans le cas de peuplements hétérogènes en âges, en diamètres ou en essences, ou quand l'âge n'est pas disponible. Le modèle est également applicable dans les peuplements équiens (peuplements où tous les arbres ont le même âge). Cette approche présente l'avantage de modéliser directement le diamètre (par classe, donc), qui est le paramètre conditionnant l'exploitation forestière, en plus d'être une variable clé de la croissance des arbres.

Dans cette étude, la ressource forestière est décrite, à partir des placettes de l'inventaire à façon, par un effectif d'arbres par classe de diamètre (amplitude de 10 cm) et un volume moyen correspondant. Les dynamiques forestières sont représentées pour chaque classe de diamètre par un recrutement (uniquement dans la première classe de diamètre), un taux de passage (croissance) des arbres dans la classe de diamètre suivante, un taux de mortalité en effectif et un taux de prélèvement en effectif (figure 8).

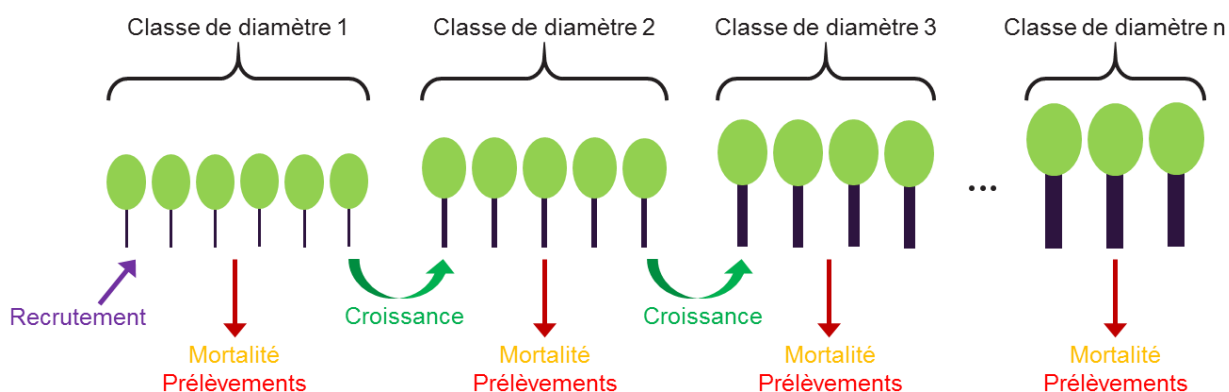


Figure 8 : Fonctionnement d'une itération du modèle par classe de diamètre (source : IGN)

Les paramètres de recrutement, croissance et mortalité ont été calibrés par domaine d'étude en utilisant 732 placettes IFN des campagnes 2013 à 2021 disponibles sur les sylvoécotésions A13 et B31 des départements 14 et 61. L'utilisation de ces placettes permet d'augmenter le nombre d'observations et donc de rendre la calibration des paramètres de dynamique forestière plus robustes tout en restant dans les mêmes conditions de fertilité que la zone d'étude (mêmes sylvoécotésions). Le taux de prélèvement est quant à lui déduit des itinéraires sylvicoles définis dans le scénario de gestion (§ III-3).

III -3 Scénario de gestion

Deux scénarios de gestion ont été définis en concertation avec l'ONF, le CNPF, la FNCOFOR et le territoire du pôle CNM :

- Un scénario « **tendanciel** » : il simule un maintien des pratiques actuelles de gestion sur les 20 ans à venir, tant du point de vue de la part de forêt gérée que du point de vue des itinéraires sylvicoles ;
- Un scénario « **gestion accrue** » : il simule une augmentation de la récolte de bois qui se traduit par une dynamisation des coupes et/ou des surfaces forestières mises en gestion. Ce scénario, volontairement intensif, ne correspond pas forcément à la stratégie de développement forestier souhaitée par le territoire, mais permet de fournir des informations sur le potentiel de mobilisation des bois.

Pour chaque scénario et chaque domaine d'étude, des pratiques sylvicoles ont été renseignées par les gestionnaires (annexe 2). Ces pratiques sont caractérisées d'une part par un ou plusieurs itinéraires sylvicoles (c'est-à-dire un âge d'exploitabilité et des âges et intensités de prélèvement en éclaircies ou des âges de passage en coupe pour la gestion en « taillis ») et d'autre part par la proportion en surface du domaine gérée selon ces itinéraires sylvicoles (donnant une information sur la mise en pratique de ces préconisations). Afin d'être appliqués en projection, les paramètres des différents itinéraires sylvicoles d'un domaine d'étude sont convertis en un taux de prélèvement moyen par classe de diamètre et par domaine d'étude, via des relations âge-diamètre calibrées sur les données IFN. Le renouvellement des surfaces

coupées est supposé identique (les peuplements coupés ne changent pas de domaine d'étude). Par ailleurs aucun aléa n'a été simulé sur l'horizon de 20 ans.

III -4 Récolte potentielle et bilan carbone

Récolte potentielle : la projection fournit des résultats sur le potentiel de récolte (ou disponibilités techniques en bois). Ces chiffres correspondent aux volumes de bois qu'il serait possible de récolter à l'échelle du territoire à une date donnée, compte-tenu du stade de développement qu'atteindrait la ressource forestière et des règles de gestion forestière qui y seraient appliquées. Ce potentiel est exprimé en volume « hors pertes d'exploitation » selon les différents compartiments de l'arbre (bois fort tige, bois fort total ou aérien total, § II-3).

- Une répartition de ce volume selon la qualité potentielle des arbres a été effectuée, à partir des observations réalisées sur le terrain lors de l'inventaire à façon. La part du volume de la tige classée en bois d'œuvre potentiel (BOP) correspond à du bois sain, sans gros défaut apparent (gélivure, cassure), suffisamment rectiligne et mesurant au moins 2 m de longueur et 20 cm de diamètre fin bout. Cette qualité potentielle, appréciée sur le terrain, reflète une utilisation techniquement possible et économiquement souhaitable du bois selon des critères de dimension et de qualité externe à un temps t et ne tient pas compte de l'usage réel des bois, qui dépend des marchés locaux et des caractéristiques internes du bois. Cette part de BOP, qui correspond à une qualité *potentielle*, est détaillée dans la [table 3](#).
- Les pertes d'exploitation (souches, branches, etc. restant en forêt suite à l'exploitation) ne sont pas incluses dans ces volumes de potentiel de récolte (ou disponibilités techniques). Dans cette étude, la part des pertes a été fixée par essence et par compartiment de l'arbre en concertation avec les gestionnaires ([table 3](#)).

	Feuillus	Résineux
Taux de bois d'œuvre en fonction du diamètre (% par rapport au bois fort total)	< 30 cm ≈ 20% 30-60 cm ≈ 35% > 60 cm ≈ 30%	< 30 cm ≈ 40% > 30 cm ≈ 55%
Part de BO restant en forêt (pertes d'exploitation)	5 %	5 %
Part du reste de la tige restant en forêt	5 %	10 %
Part des grosses branches restant en forêt	10 %	15%
Part des menus bois restant en forêt	50 %	100 %

Table 3 : Part du bois d'œuvre potentiel et des pertes d'exploitation par essence

Bilan carbone projeté : les résultats de la projection permettent d'évaluer la contribution à l'atténuation de l'effet de serre de la filière forêt-bois du territoire (bilan carbone) sur les 20 ans à venir, c'est-à-dire le stockage de carbone (en flux) lié à l'évolution de la ressource forestière et la fabrication des produits bois (à ne pas confondre avec le stock de carbone du bois sur pied, du bois mort ou du sol, qui est un capital à un instant t). Cette contribution se décompose en différents compartiments :

- Le stockage (flux) de carbone dans la biomasse, lié à l'activité photosynthétique de la végétation. Ce stockage est évalué grâce à l'évolution des volumes de bois sur pied, et donc des stocks de carbone contenus dans les arbres (§ II -3), sur la période de projection (20 ans dans le cadre de ce PAT).

- Le stockage (flux) de carbone dans le bois mort et dans les sols. Pour le bois mort, le stockage est estimé par différence entre les flux entrants (mortalité et pertes d'exploitation projetées) et les flux sortants (stocks initiaux de carbone dans le bois mort issus des données du PAT et des données IFN auxquels sont appliqués des demi-vies de 5 ans pour les branches de moins de 7 cm, de 10 ans pour les résineux et de 30 ans pour les feuillus⁴). Pour les sols, faute de données de références valables à l'échelle du PAT, le stockage de carbone n'y est pas évalué.
- Le stockage (flux) de carbone dans les produits bois issus de la forêt. Celui-ci est évalué grâce au potentiel de récolte permis par le scénario, qui est réparti en volumes de produits finis. Il s'agit du stockage de carbone dans les produits bois issus des forêts du territoire et non dans ceux qui sont consommés par les habitants du territoire. La répartition entre les produits issus de grumes, de bois d'industrie et de bois d'énergie est calculée à partir des données Agreste⁵ et des données de récolte IFN en Basse-Normandie (figure 9). Cette répartition est ensuite associée aux valeurs de rendements des différentes filières⁶ pour connaître les volumes de produits finis. Une demi-vie est appliquée aux volumes de produits finis (figure 9) ce qui permet de calculer les flux de carbone annuels dans ces produits.

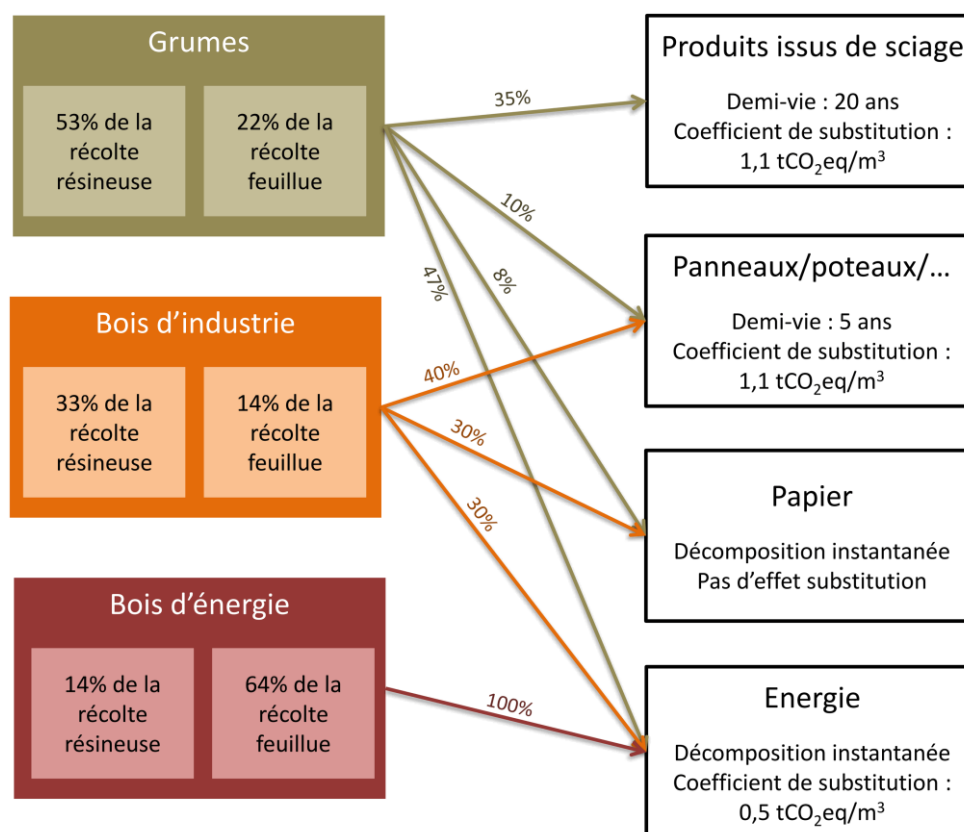


Figure 9 : Coefficients utilisés pour la répartition de la récolte potentielle en produits finis et le calcul du stockage et de la substitution liés aux produits bois.

⁴ Roux, A. et al. 2017. Quel rôle pour les forêts et la filière forêt-bois française dans l'atténuation du changement climatique ? (INRA, IGN).

⁵ Maaf, Service de la statistique et de la prospective, Agreste 2018. Enquête annuelle de branche exploitation forestière. Données consultables sur <https://stats.agriculture.gouv.fr/disar-web/disaron/EXFNR00/detail.disar>

⁶ IGN, 2020. Note préparatoire aux IGD 2020. Indicateur de contribution des écosystèmes forestiers et de la filière forêt-bois à l'atténuation de l'effet de serre (bilan carbone).

- L'effet substitution, qui comptabilise les émissions carbone évitées lors de l'utilisation du bois à la place d'énergies non renouvelables ou de matériaux plus émetteurs de CO₂ que le bois (béton, aluminium...). Cet effet est différent des autres composantes du bilan carbone dans le sens où il ne correspond ni à des émissions, ni à des absorptions de carbone. Il représente en fait des émissions qui se produiraient dans d'autres secteurs que la forêt si le bois n'était pas du tout utilisé. Il ne peut pas directement être sommé au stockage de carbone, mais fournit une indication sur les autres bénéfices liés à l'utilisation du bois en termes de gaz à effet de serre et permet de prendre en compte ces effets indirects dans la comparaison de scénarios de gestion. La substitution est estimée par l'application de coefficients de substitution Erreur ! Signet non défini. (figure 9) aux volumes de produits finis, eux-mêmes calculés selon la méthode décrite au point précédent. De la même façon que pour le stockage dans les produits, la substitution est ici liée aux émissions évitées par l'utilisation des produits bois issus des forêts du territoire et non par celle des produits bois qui sont consommés par les habitants du territoire.

Toutes ces estimations reposent sur des hypothèses fortes et sensibles, notamment concernant la répartition en produits et la valeur des coefficients de substitution, qui sont tous deux empreints d'incertitudes. Par ailleurs, ces coefficients et taux sont appliqués de façon fixe dans le temps, simplifiant la réalité future. Une évaluation précise de la demande et de la consommation en bois sur le territoire pourrait permettre d'améliorer certains de ces coefficients et d'intégrer les volumes de bois consommés sur le territoire pour le calcul du stockage dans les produits, ainsi que l'effet substitution (au lieu de les calculer par rapport aux volumes de bois issus des forêts du territoire).

IV- Résultats sur la ressource forestière actuelle

IV -1 Indicateurs au niveau du territoire

La surface des forêts « disponibles » pour la production de bois (hors landes, § II-2) sur le territoire du pôle CNM est estimée à **12 400 ha** ($\pm 1\ 000$ ha), soit près de 8 % de la surface. Environ 11 700 ha sont situés sur des parcelles privées, dont 29 % disposent d'un plan simple de gestion. Les 700 ha restants sont des propriétés publiques incluant deux forêts domaniales et six forêts communales ou départementales (table 4).

Les peuplements du territoire représentent un volume bois fort total de **3,66 Mm³** ($\pm 530\ 000$ m³), soit environ 295 m³/ha (± 38 m³/ha). Le chêne pédonculé représente l'essence majoritaire (26 % du volume bois fort total) devant le chêne sessile (16 %), le hêtre (10 %), le frêne (10 %) et les pins (8 %). Les autres feuillus (bouleau, noisetier, érable, etc.) représentent 21 % du volume bois fort total et les autres résineux 9 % (figure 10).

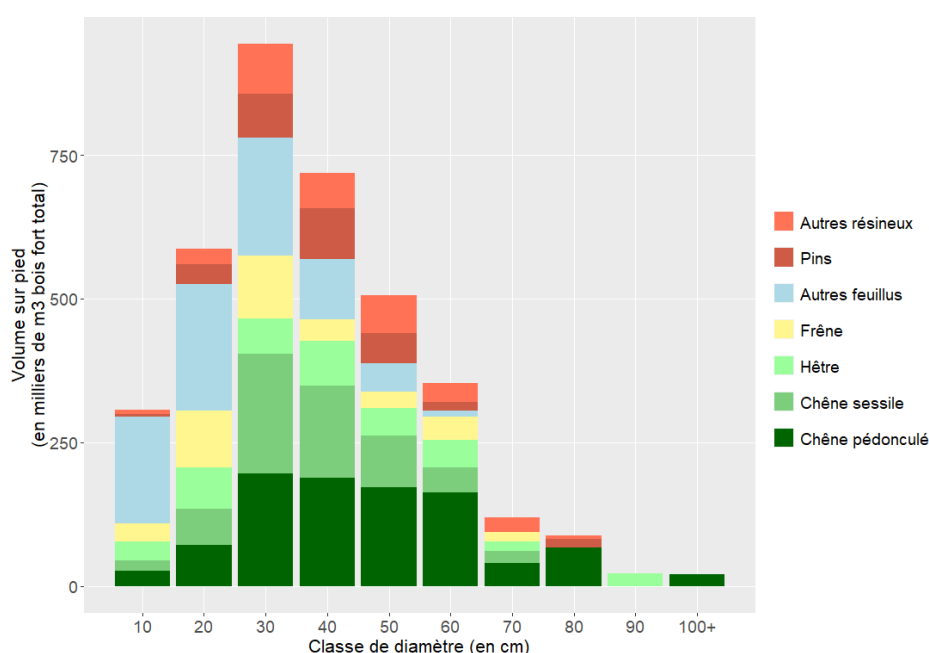


Figure 10 : Répartition du volume bois fort total par essence et classe de diamètre

Les forêts publiques sont légèrement plus capitalisées que les forêts privées (301 m³/ha contre 294 m³/ha). Leurs proportions en résineux sont similaires (entre 15 et 16 %). La production biologique brute en bois fort total s'élève à **115 000 m³/an** ($\pm 19\ 000$ m³/an), soit 8,3 m³/ha/an en forêt publique et 9,3 m³/ha/an en forêt privée. Les peuplements feuillus représentent 74 % de cette production brute et les résineux 26 % (table 4).

		Surface (ha)	Volume bois fort total (m3)	Production brute bois fort total (m3/an)	Production nette bois fort total (m3/an)
Forêts privées	Feuillus	11 700	2 877 000	80 700	67 900
	Résineux		567 000	28 300	26 100
Forêts publiques	Feuillus	700	187 000	4 500	4 000
	Résineux		34 000	1 600	1 400
Total		12 400	3 665 000	115 100	99 400

Table 4 : Ressource forestière actuelle par type de propriété et par groupe d'essences

Le volume de bois d'œuvre potentiel sur le territoire s'élève à 1,18 Mm³ (\pm 240 000 m³), soit environ 95 m³/ha (\pm 19 m³/ha). Il provient à 73 % des feuillus et à 27 % des résineux. Le volume de bois d'œuvre potentiel représente 53 % du volume bois fort total des résineux et 28 % du bois fort total des feuillus.

IV -2 Analyse de l'évolution historique

Une analyse rapide mobilisant des données historiques de l'inventaire forestier national a été réalisée pour cerner l'évolution de la ressource locale, sur un territoire toutefois plus étendu que celui du pôle CNM (régions forestières nationales), la localisation des points historiques n'étant pas connue plus précisément qu'à cette échelle. Cette analyse a mobilisé 417 points de l'inventaire départemental IFN de 1985, 314 points de l'inventaire départemental IFN de 2000 et 154 points des campagnes nationales annuelles IFN 2009-2021 (représentant l'année moyenne 2015). Les résultats présentés pour l'année 2023 (obtenus à partir des 128 points levés de l'inventaire à façon du PAT) sont quant à eux limités au seul territoire du pôle CNM.

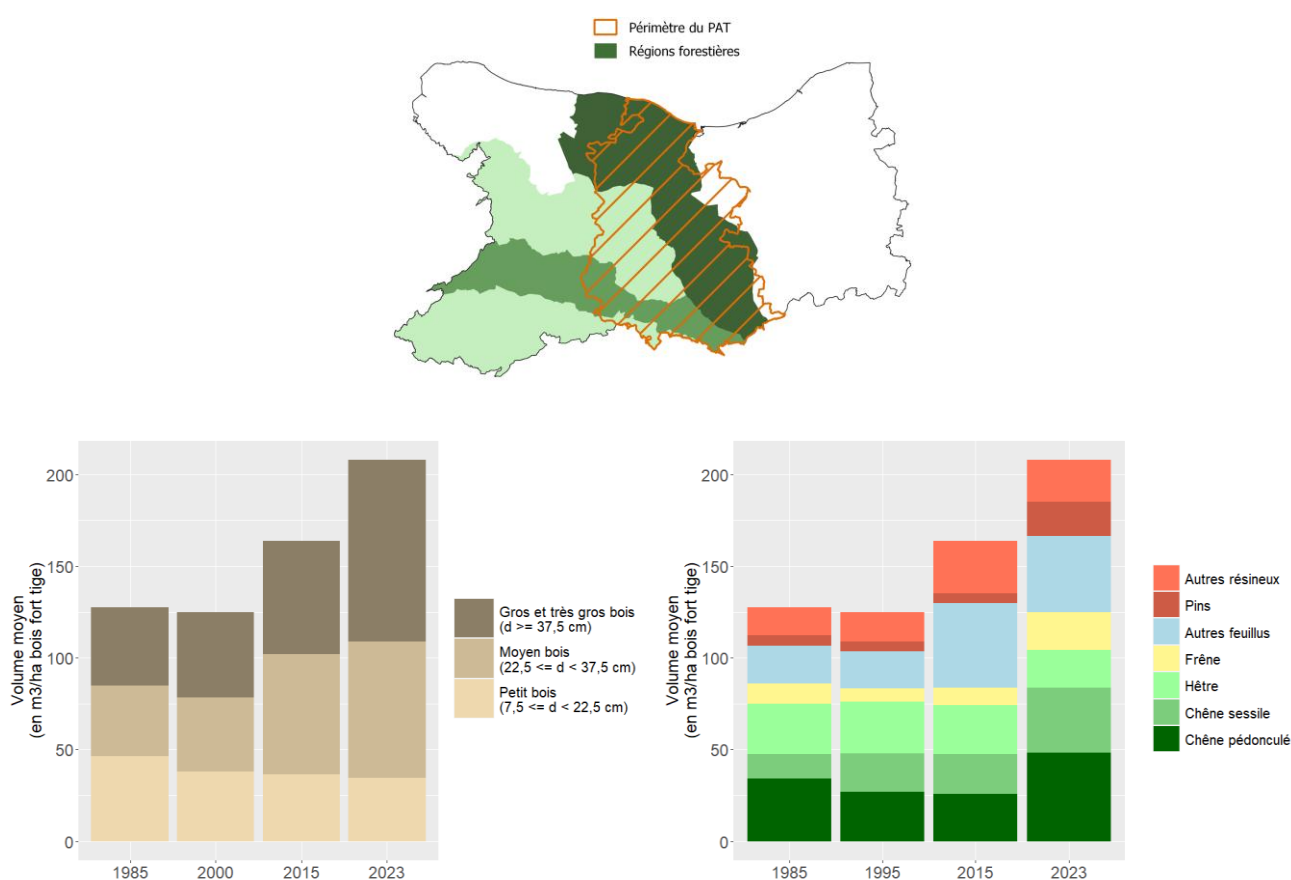


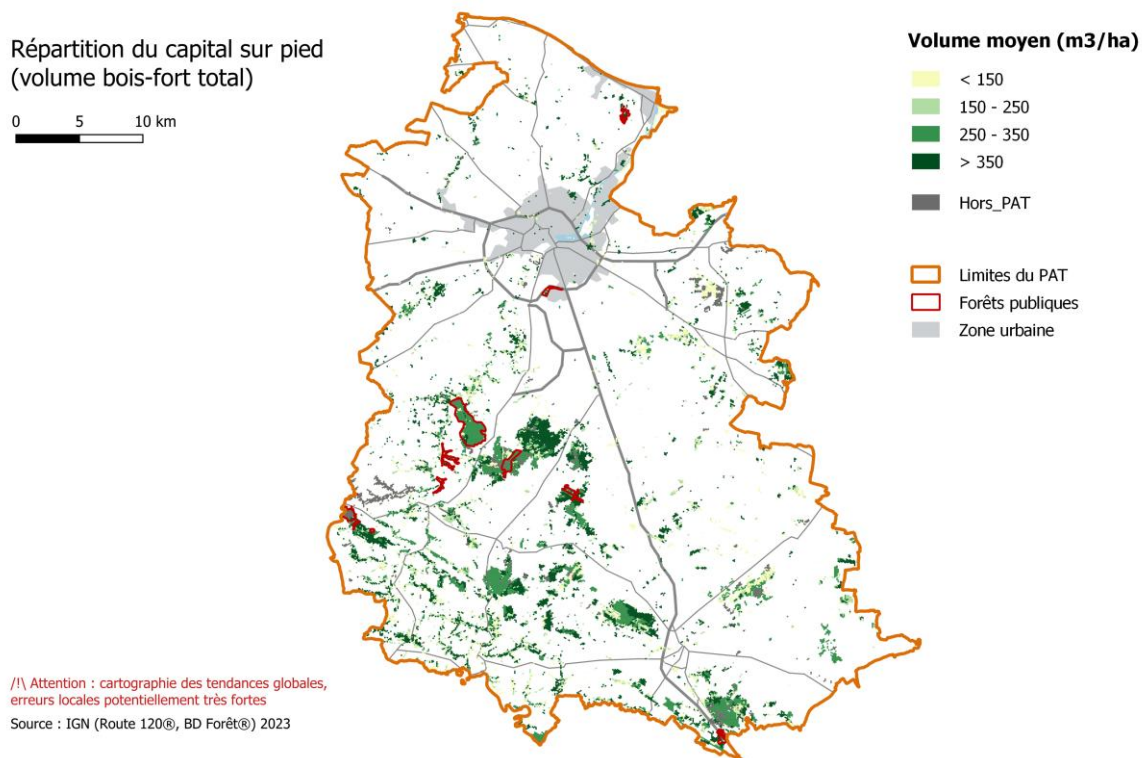
Figure 11 : Evolution historique du stock de bois sur pied entre 1985 et 2023 par catégorie de diamètre et groupe d'essences (en bois fort tige).

NB : les valeurs à l'hectare correspondent à celles des essences feuillues et résineuses sur l'ensemble du territoire et non à celles dans les peuplements feuillus et résineux.

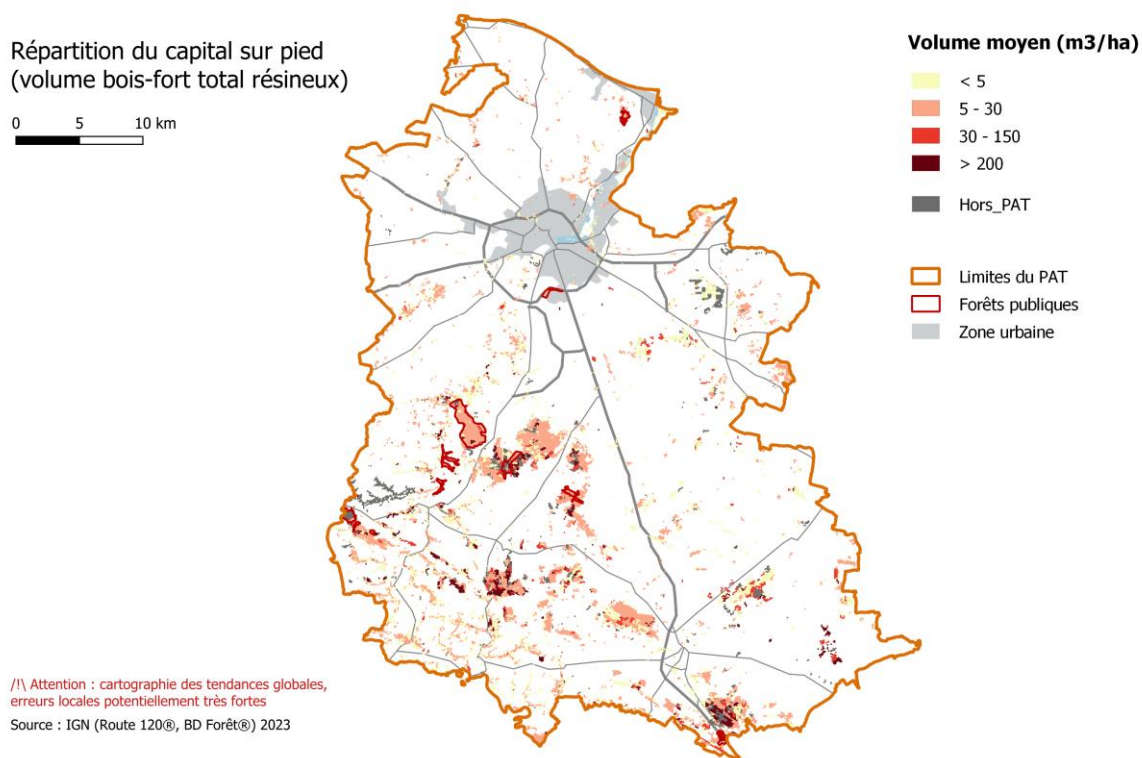
Les résultats révèlent une augmentation du volume moyen à l'hectare sur les dernières décennies (aux incertitudes près). La maturation de la ressource, essentiellement due aux essences feuillues, se traduit par une augmentation des stocks de moyens, gros et très gros bois, le stock de petits bois présentant quant à lui une diminution (renouvellement possiblement faible), voir figure 11. Une vigilance particulière est requise dans l'interprétation de ces chiffres compte-tenu de la faible robustesse des résultats. D'autres facteurs peuvent aussi induire des différences entre périodes (changements de définitions des forêts et des forêts disponibles, etc.).

IV -3 Répartition du capital sur pied

Des valeurs moyennes de volume à l'hectare ont été calculées par strate cartographique (annexe 3) pour illustrer la répartition spatiale de la ressource actuelle. Ces cartes sont toutefois à interpréter globalement, par grandes tendances, les erreurs locales de cette cartographie pouvant être très fortes (§ I).



Carte 1 : Répartition du capital sur pied (volume bois fort total)



Carte 2 : Répartition du capital sur pied résineux (volume bois fort total résineux)

V- Résultats de la projection à l'horizon 2040

V-1 Volumes de récolte potentielle

Selon l'hypothèse du maintien des pratiques sylvicoles actuelles retenue dans le **scénario « tendanciel »**, la récolte potentielle (ou disponibilités techniques) projetée sur les 20 prochaines années sur le territoire du pôle CNM serait de l'ordre de **82 500 m³/an** en moyenne. La forêt privée serait le contributeur majoritaire de cette récolte potentielle (environ 94 % du volume). Les pratiques actuelles permettraient de prélever 62 % de la production biologique (taux de prélèvement de **62 %**). Selon l'hypothèse d'une intensification de la récolte retenue dans le **scénario « gestion accrue »**, la récolte potentielle projetée sur les 20 prochaines années serait de l'ordre de **89 000 m³/an** en moyenne, dont 94 % en forêt privée, pour un taux de prélèvement de **69 %** (table 5, figure 12).



Figure 12 : Evolution de la récolte potentielle par scénario et type de propriété

Dans le **scénario « tendanciel »**, le chêne pédonculé représenterait la plus grosse part du volume de récolte potentielle (22 %), devant le chêne sessile (13 %), le frêne (11,5 %), les pins (10,5 %) et le hêtre (9 %). Les autres feuillus et les autres résineux représenteraient respectivement 20 % et 14 % de la récolte. Dans le **scénario « gestion accrue »**, le chêne pédonculé représenterait 20 % du volume de récolte potentielle, le chêne sessile 14 %, le frêne 11 %, les pins 10 % et le hêtre 10 %, les autres feuillus et les autres résineux représentant respectivement 22 % et 12 % de la récolte.

La **qualité potentielle** estimée dans les résultats de la projection correspond à l'application de la qualité externe du bois observée sur le terrain lors de l'inventaire (§ III-4). Elle ne tient donc pas compte des usages réels du bois. Dans le **scénario « tendanciel »**, environ **57 % de la récolte de résineux** pourrait potentiellement être valorisée en bois d'œuvre (le stock total étant toutefois faible), et **29 % pour les feuillus**. Dans le **scénario « gestion accrue »**, la récolte potentiellement valorisable en bois d'œuvre serait de **56 % pour les résineux et 29 % pour les feuillus** (figure 13).

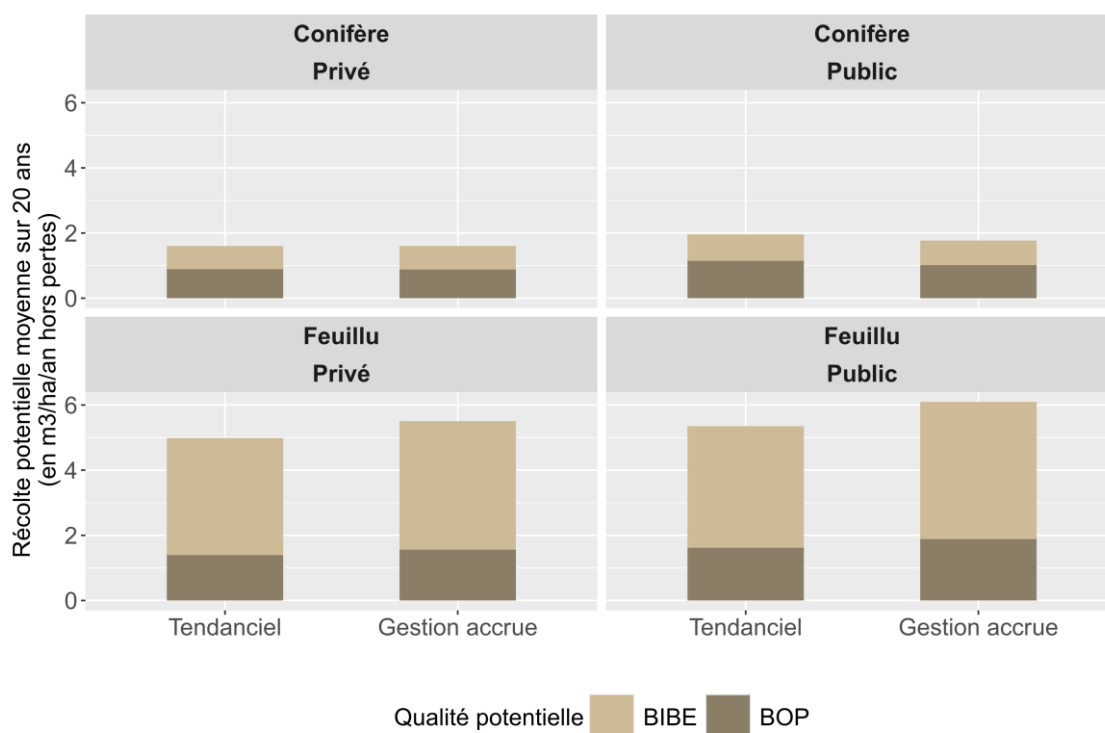


Figure 13 : Répartition de la récolte potentielle à l'hectare par groupe d'essences et qualité potentielle, pour les deux scénarios retenus.

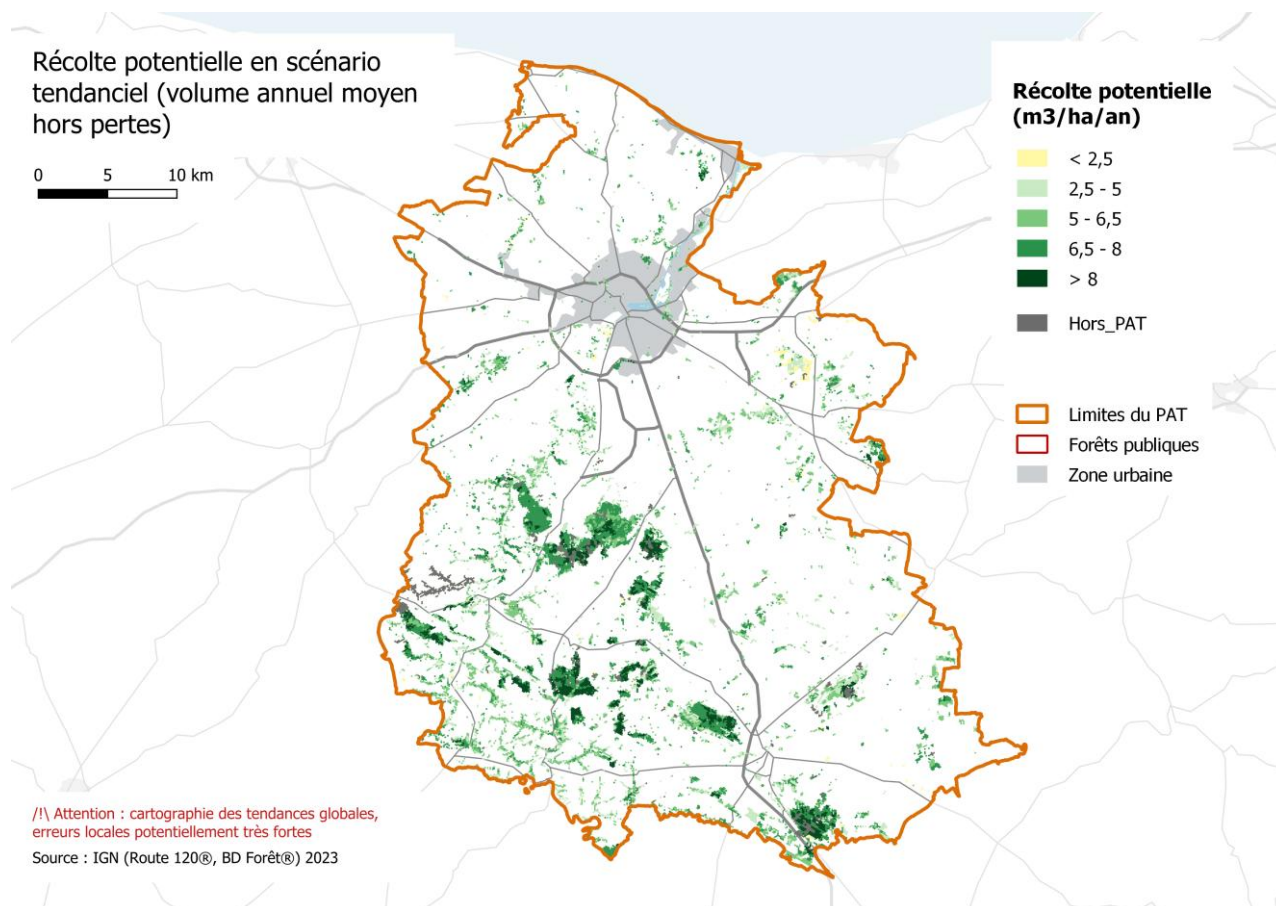
NB : les valeurs à l'hectare correspondent à celles des essences feuillues et résineuses sur l'ensemble du territoire et non celles dans les peuplements feuillus et résineux.

		Scénario tendanciel (m3/an)	Scénario gestion accrue (m3/an)
Forêts privées	Feuillus	58 360	64 440
	Conifères	18 750	18 770
Forêts publiques	Feuillus	3 920	4 470
	Conifères	1 440	1 300
Total		82 470	88 980

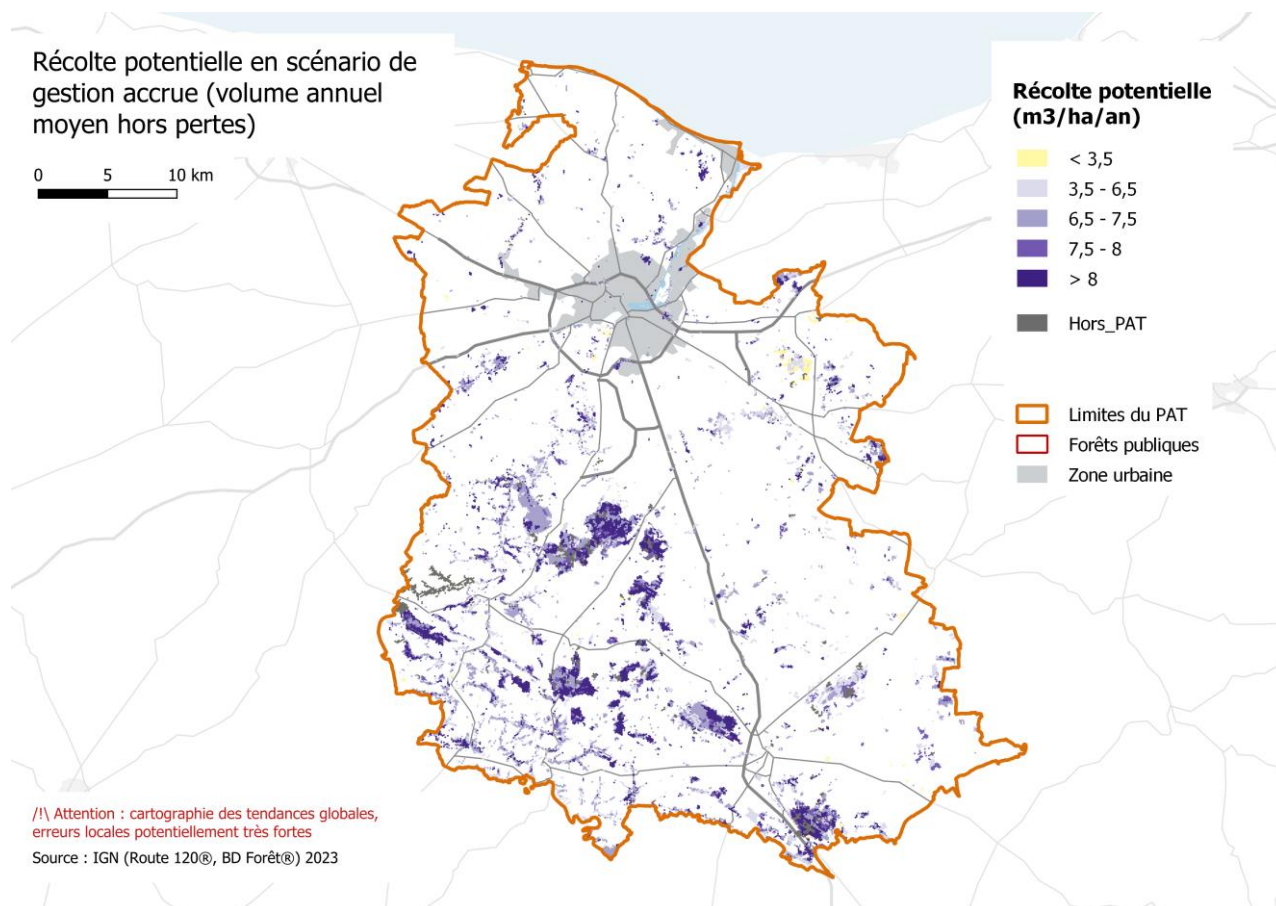
Table 5 : Récolte potentielle moyenne entre 2020 et 2040 par type de propriété et par groupe d'essences, pour les deux scénarios retenus

V -2 Localisation de la récolte potentielle

Selon la même méthode que pour la spatialisation de la ressource forestière actuelle, la récolte potentielle a été calculée par strate cartographique et par type de propriété (annexes 3 et 4). Les critères géographiques utilisés (groupes d'essences de la BD Forêt, hauteur des modèles numériques et type de propriété) permettent seulement de répartir cette récolte potentielle sur le territoire selon des plages moyennes par grandes zones. Cette carte ne représente en aucun cas une prédiction de la localisation des coupes qui pourraient avoir lieu dans les 20 ans à venir. Cette carte est à interpréter de façon globale, par grandes tendances, et surtout pas à l'échelle de la parcelle ou du pixel (§ I).



Carte 3 : Répartition de la récolte potentielle en scénario tendanciel (volume annuel moyen hors pertes)



Carte 4 : Répartition de la récolte potentielle en scénario gestion accrue (volume annuel moyen hors pertes)

V -3 Evolution du stock de bois sur pied

Quel que soit le scénario considéré, le simulateur prédit une augmentation du volume de bois sur pied durant les 20 ans de la projection, en forêt privée comme en forêt publique (figure 14 et table 6). Cela signifie que les deux scénarios élaborés s'inscrivent dans une gestion durable sans décapitalisation à l'échelle du territoire, le prélèvement restant inférieur à la production biologique.

Dans le **scénario « tendanciel »**, la capitalisation représente une évolution de + 29 % en 20 ans, le volume bois fort total sur pied passant de 295 m³/ha à 380 m³/ha entre 2020 et 2040, c'est-à-dire de 3,66 Mm³ à 4,72 Mm³. Dans le **scénario « gestion accrue »**, la capitalisation représente une évolution de + 23 %, le volume bois fort total sur pied passant de 295 m³/ha à 365 m³/ha entre 2020 et 2040, c'est-à-dire de 3,66 Mm³ à 4,52 Mm³ (table 6).

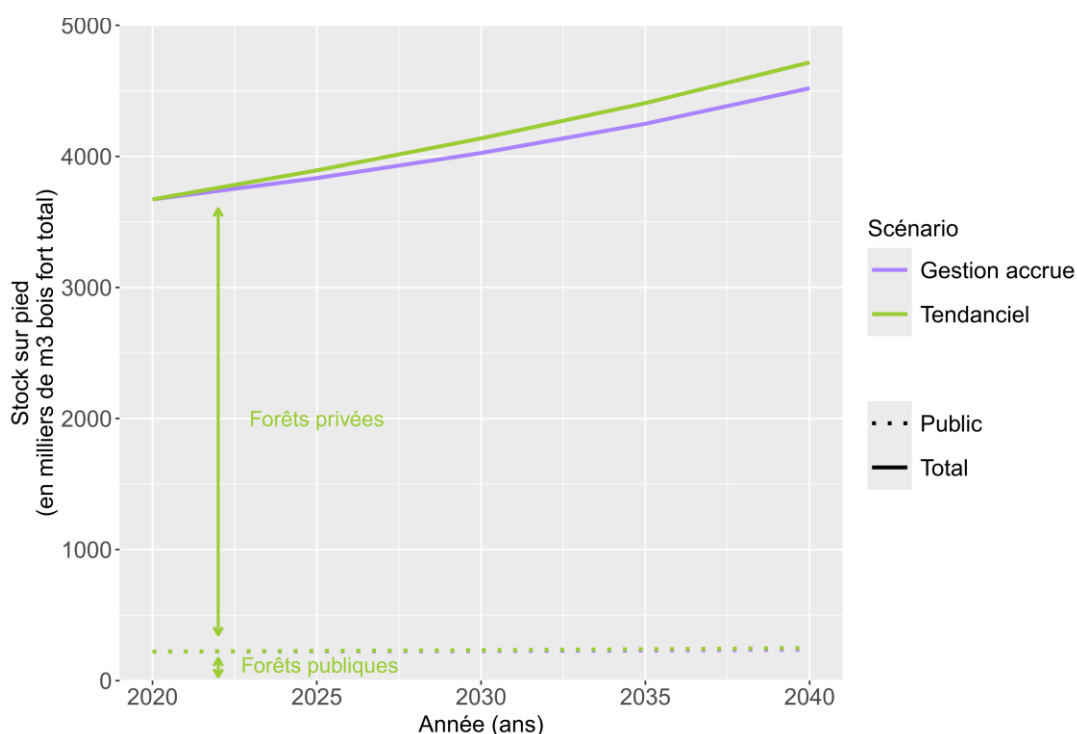


Figure 14 : Evolution du stock de bois sur pied par type de propriété, pour les deux scénarios retenus

		2020	2040	
		Inventaire PAT (m3)	Scénario tendanciel (m3)	Scénario gestion accrue (m3)
Forêts privées	Feuillus	2 877 000	3 681 000	3 510 000
	Conifères	567 000	787 000	773 000
Forêts publiques	Feuillus	187 000	209 000	195 000
	Conifères	34 000	40 000	42 000
Total		3 665 000	4 717 000	4 520 000

Table 6 : Stock de bois sur pied en volume bois fort total actuel (2020) et projeté (2040) par type de propriété et par groupe d'essences, pour les deux scénarios retenus

La capitalisation est due à une maturation de la ressource dans toutes les catégories de diamètre, que ce soit en forêt publique ou en forêt privée, en peuplement de feuillus ou en peuplement de conifères (figure 15).

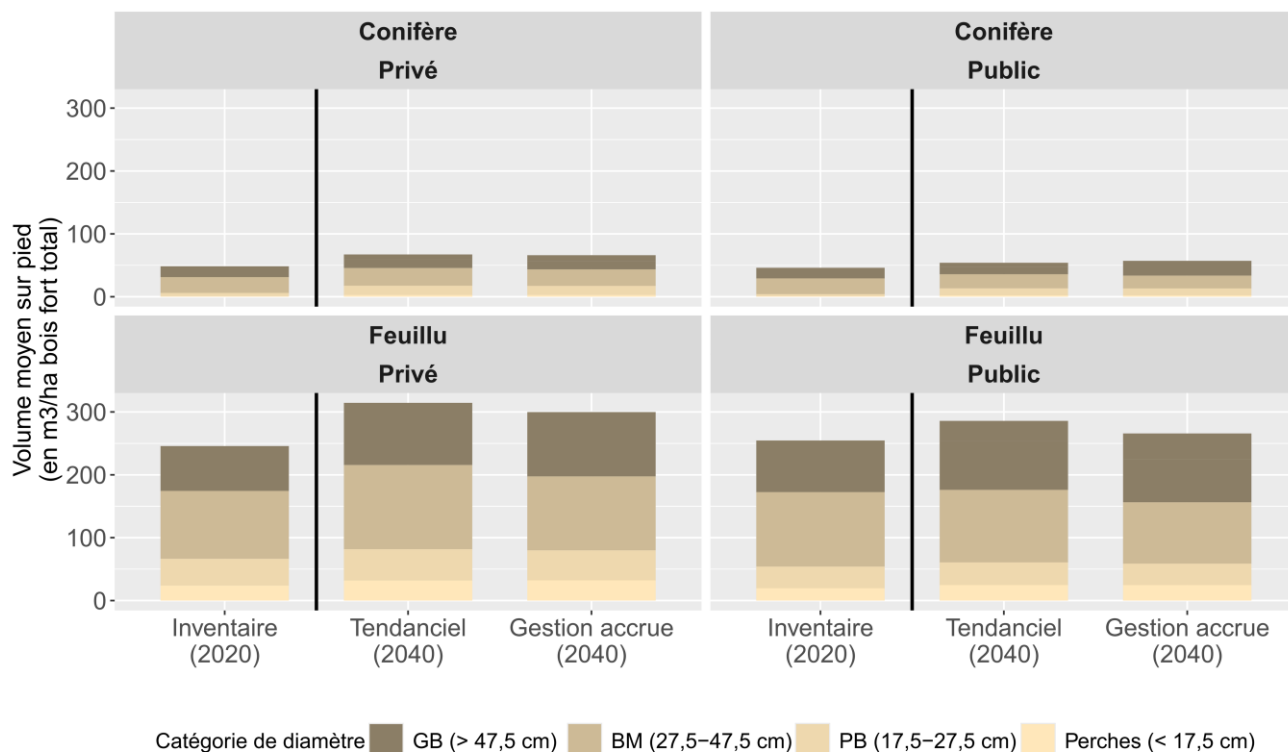


Figure 15 : Répartition du volume de bois à l'hectare par groupe d'essence et catégorie de diamètre.

NB : les valeurs à l'hectare correspondent à celles des essences feuillues et résineuses sur l'ensemble du territoire et non celles dans les peuplements feuillus et résineux.

V -4 Bilan carbone projeté

Les résultats de la projection permettent d'estimer globalement la contribution éventuelle de la filière forêt-bois dans le bilan carbone du territoire en termes de stockage de carbone en forêt, de stockage dans les produits bois et d'émissions évitées du fait de l'utilisation de produits à base de bois à la place d'énergies non renouvelables et d'autres matériaux (§ III-4). Ces informations permettent d'enrichir les diagnostics des Plans Climat Air Energie Territoriaux (PCAET) demandés aux EPCI de plus de 20 000 habitants.

La forêt et la filière forêt-bois sont des contributeurs importants dans le bilan carbone du territoire, stockant chaque année plusieurs milliers de tonnes de CO₂ dans les écosystèmes (table 7). A titre de comparaison, en France métropolitaine, la séquestration dans la biomasse et le bois mort représente 63 millions et la substitution 32 millions de tCO₂eq/an (le stockage dans les produits bois a une contribution très faible)⁷.

⁷ IGN, 2020. Note préparatoire aux IGD 2020. Indicateur de contribution des écosystèmes forestiers et de la filière forêt-bois à l'atténuation de l'effet de serre (bilan carbone).

ktCO₂/an : milliers de tonnes de CO₂ équivalent par an
MtCO₂/an : millions de tonnes de CO₂ équivalent par an

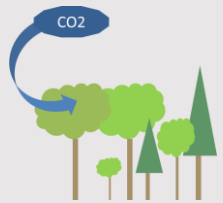

		Scénario tendanciel sur le territoire du PAT	Scénario gestion accrue sur le territoire du PAT	Valeur de référence France entière en 2015
Stockage (flux) de carbone en forêt 	Biomasse aérienne et racinaire feuillue	53,4 ktCO ₂ eq/an	41,3 ktCO ₂ eq/an	63,0 MtCO ₂ eq/an
	Biomasse aérienne et racinaire résineuse	12,7 ktCO ₂ eq/an	12,0 ktCO ₂ eq/an	
	Bois mort	2,4 ktCO ₂ eq/an	2,1 ktCO ₂ eq/an	0,0 MtCO ₂ eq/an
	Sols	Non estimé		20,0 MtCO ₂ eq/an
	Total	68,4 ktCO ₂ eq/an	55,4 ktCO ₂ eq/an	83 MtCO ₂ eq/an
Stockage dans les produits bois		0,0 ktCO ₂ eq/an	0,0 ktCO ₂ eq/an	2,3 MtCO ₂ eq/an
Effet substitution 	Matériaux	18,8 ktCO ₂ eq/an	19,9 ktCO ₂ eq/an	14,2 MtCO ₂ eq/an
	Energie	29,4 ktCO ₂ eq/an	32,0 ktCO ₂ eq/an	18,1 MtCO ₂ eq/an
	Total	48,2 ktCO ₂ eq/an	51,9 ktCO ₂ eq/an	32,3 MtCO ₂ eq/an
TOTAL		116,6 ktCO ₂ eq/an	107,3 ktCO ₂ eq/an	117,6 MtCO ₂ eq/an

Table 7 : Valeurs des composantes du bilan carbone sur la période projetée de 2020-2040

Le stockage de carbone en forêt dans la biomasse est lié à la production biologique, par le biais de la photosynthèse. Dans cette étude, elle est plus forte chez les feuillus, largement majoritaires sur le territoire. Quel que soit le scénario considéré, la forêt du territoire continue de stocker du carbone durant les 20 ans de la projection : en effet, bien que les prélèvements soient plus intenses dans le scénario « gestion accrue » que dans le scénario « tendanciel », ils restent en deçà de la production biologique nette (mortalité déduite) et le stockage garde une valeur positive. De plus, le « ralentissement » du stockage de carbone calculé par le simulateur dans le scénario « gestion accrue » n'est valable qu'à court terme : la conduite sylvicole qui sera appliquée au futur peuplement pourra à nouveau favoriser la séquestration (table 7).

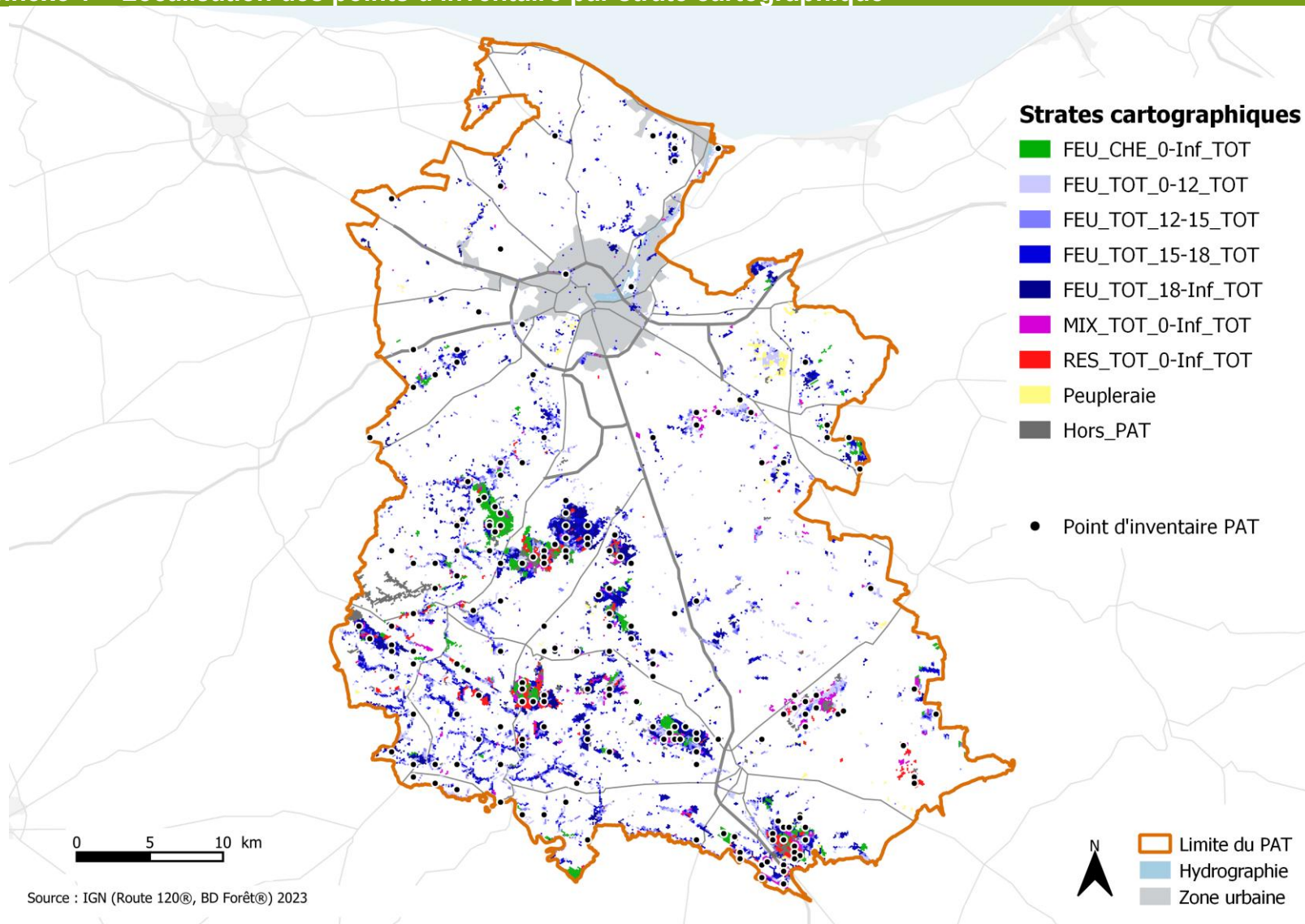
La contribution du bois mort au stockage de carbone est très faible et celle des sols ne peut être estimée de façon suffisamment fiable. Cependant, les sols constituent un réservoir important de carbone à préserver (ce dernier est par ailleurs fortement influencé par les pratiques sylvicoles). Le stock de carbone dans le sol (et non le flux de stockage) compte en effet pour 256 tCO₂eq/ha, en moyenne, d'après les données régionales du réseau RMQS⁸, soit l'équivalent de 63 % du stock de carbone présent dans la biomasse et la nécromasse (409 tCO₂eq/ha).

Les incertitudes de ces chiffres à l'échelle du PAT restent toutefois importantes en raison de leur forte sensibilité aux coefficients de demi-vie et de substitution, auxquelles s'ajoutent les incertitudes liées à la projection.

⁸ RMQS Réseau de mesures de la qualité des sols : <https://www.gissol.fr/donnees/tableaux-de-donnees/stock-de-C-par-region-et-par-occupation-du-sol-3045>

VI- Annexes

Annexe 1 – Localisation des points d'inventaire par strate cartographique



Annexe 2 – Itinéraires sylvicoles et domaines d'étude

SCENARIO "TENDANCIEL"

(Simulation d'un maintien des pratiques de gestion actuelles, les itinéraires sylvicoles et la surface gérée restant les mêmes sur les 20 ans à venir)

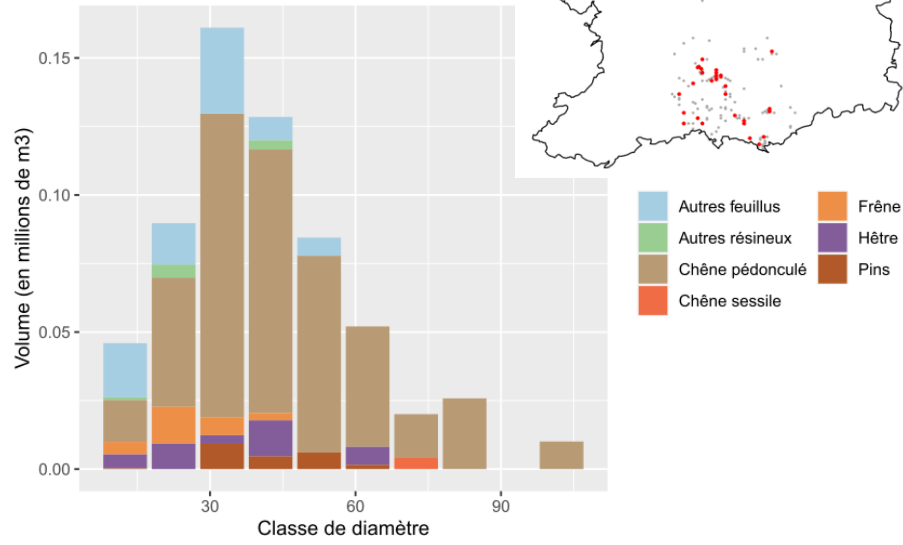
Domaine d'étude (DE)		Sans amélioration		Avec coupes d'amélioration						Sans gestion	
		Âge de coupe (ans)	Part du domaine (% surface)	Âge 1ère éclaircie (ans)	Intensité 1ère éclaircie (% volume)	Rotation écl. suivantes (ans)	Nombre éclaircies suivantes	Intensité écl. suivantes (% volume)	Age d'exploitation (ans)	Part du domaine (% surface)	Part du domaine (% surface)
Chêne pédonculé	Avec DGD	150	10%	40	25	10	10	15	140-180	75%	15%
	Sans DGD	150	10%	50	20	15	6	15	150	70%	20%
Chêne sessile	Avec DGD	150	10%	40	25	10	9	15	140-180	80%	10%
	Sans DGD	150	10%	50	20	15	6	15	140-180	70%	20%
Hêtre	Avec DGD	100	10%	25	25	10	6	15	80-120	80%	10%
	Sans DGD	120	10%	40	25	10	8	15	120	70%	20%
Frêne	Avec DGD	80	20%	30	25	8	6	20	80	70%	10%
	Sans DGD	80	20%	40	25	10	4	15	80	60%	20%
Autres feuillus	Avec DGD	60	30%	20	25	8	6	15	70	60%	10%
	Sans DGD	70	10%	30	25	10	5	15	80	70%	20%
Pins	Avec DGD	90-100	30%	20-25	30	12	5	20	80-90	60%	10%
	Sans DGD	90-100	40%	30	30	15	4	20	80-90	50%	10%
Autres résineux	Avec DGD	-	-	20	30	7	6	20	50-70	90%	10%
	Sans DGD	-	-	30	30	10	4	20	50	70%	30%

SCENARIO "GESTION ACCRUE"

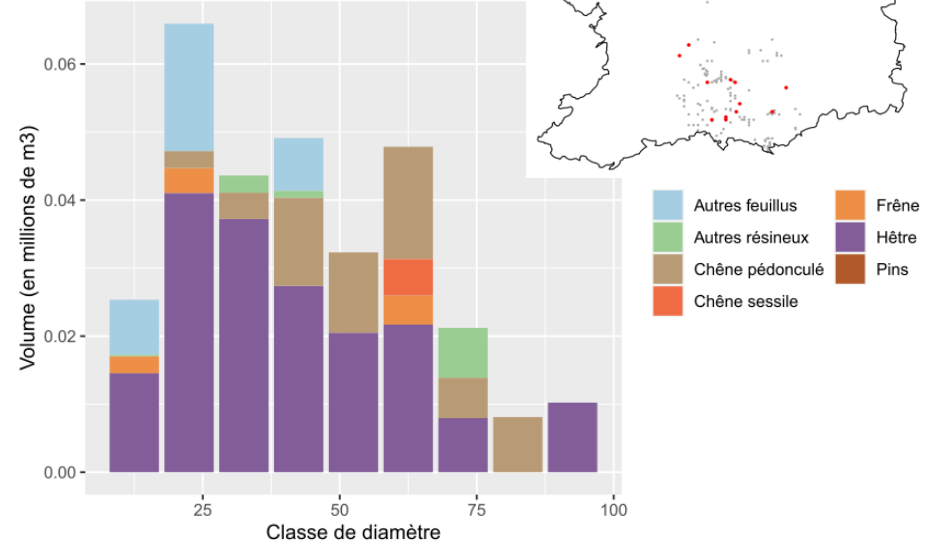
(Simulation d'une intensification de la récolte, les itinéraires sylvicoles et la surface gérée restant les mêmes sur les 20 ans à venir)

Domaine d'étude (DE)		Sans amélioration		Avec coupes d'amélioration						Sans gestion	
		Âge de coupe (ans)	Part du domaine (% surface)	Âge 1ère éclaircie (ans)	Intensité 1ère éclaircie (% volume)	Rotation écl. suivantes (ans)	Nombre éclaircies suivantes	Intensité écl. suivantes (% volume)	Age d'exploitation (ans)	Part du domaine (% surface)	Part du domaine (% surface)
Chêne pédonculé	Avec DGD	100	10%	40	25	10	5	15	100	75%	15%
	Sans DGD	100	10%	50	20	15	5	15	100	70%	20%
Chêne sessile	Avec DGD	130	10%	30	25	10	9	15	120-140	80%	10%
	Sans DGD	130	10%	50	20	15	6	15	140-180	80%	10%
Hêtre	Avec DGD	90	10%	20	25	8	5	20	60-80	80%	10%
	Sans DGD	70	10%	40	25	12	2	15	70	70%	20%
Frêne	Avec DGD	50	10%	30	25	8	2	20	50	80%	10%
	Sans DGD	50	20%	40	25	10	1	15	50	50%	30%
Autres feuillus	Avec DGD	60	20%	20	25	8	5	15	60	70%	10%
	Sans DGD	70	20%	30	25	8	5	15	70	70%	10%
Pins	Avec DGD	90-100	30%	20-25	30	12	5	20	80-90	60%	10%
	Sans DGD	90-100	30%	30	30	15	4	20	80-90	60%	10%
Autres résineux	Avec DGD	-	-	20	30	7	5	20	50	90%	10%
	Sans DGD	-	-	25	30	10	4	20	50	80%	20%

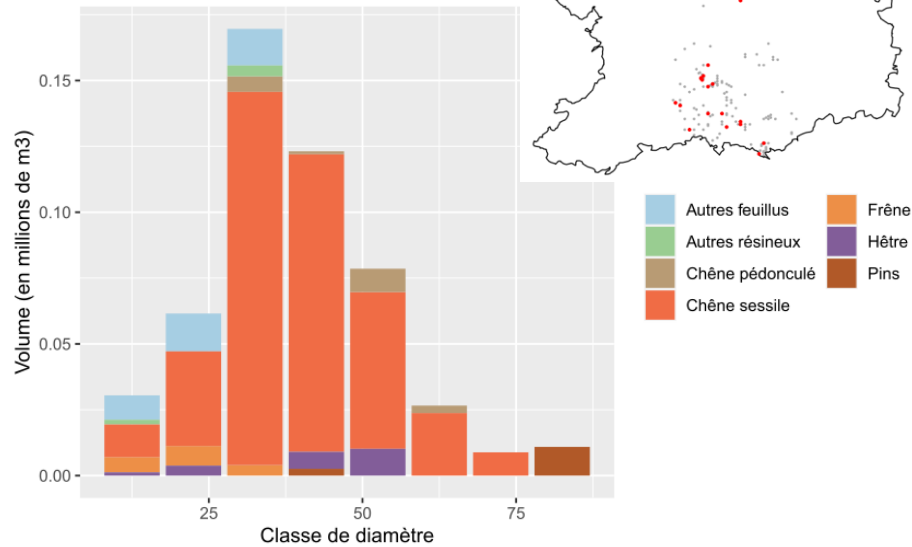
Chêne pédonculé



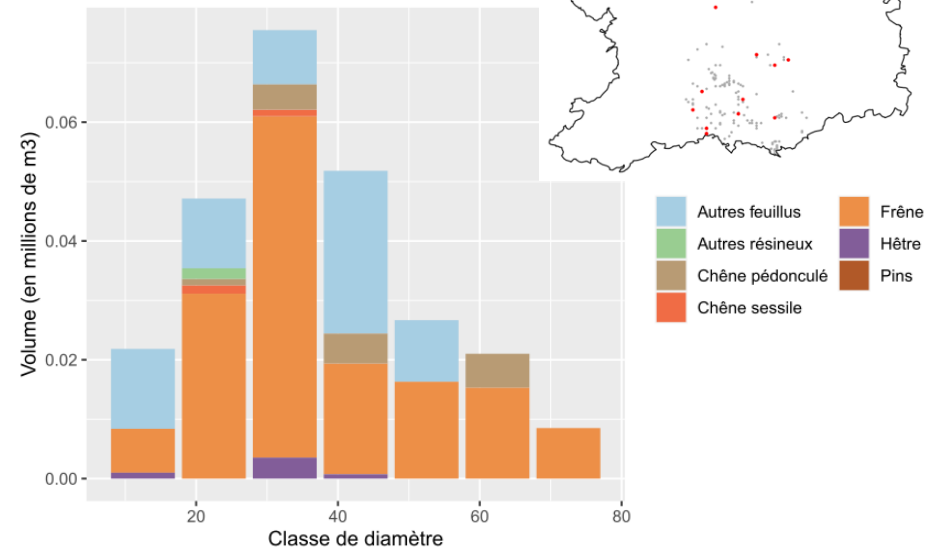
Hêtre



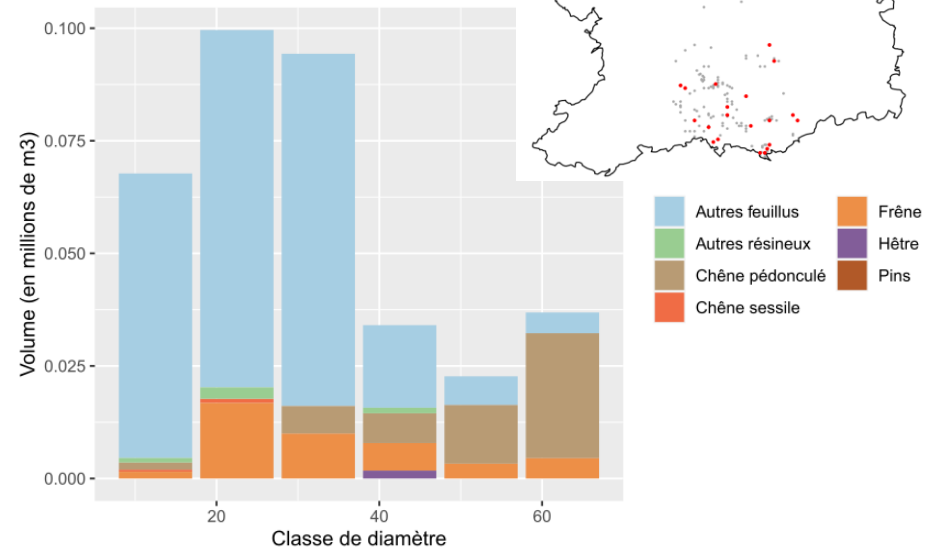
Chêne sessile



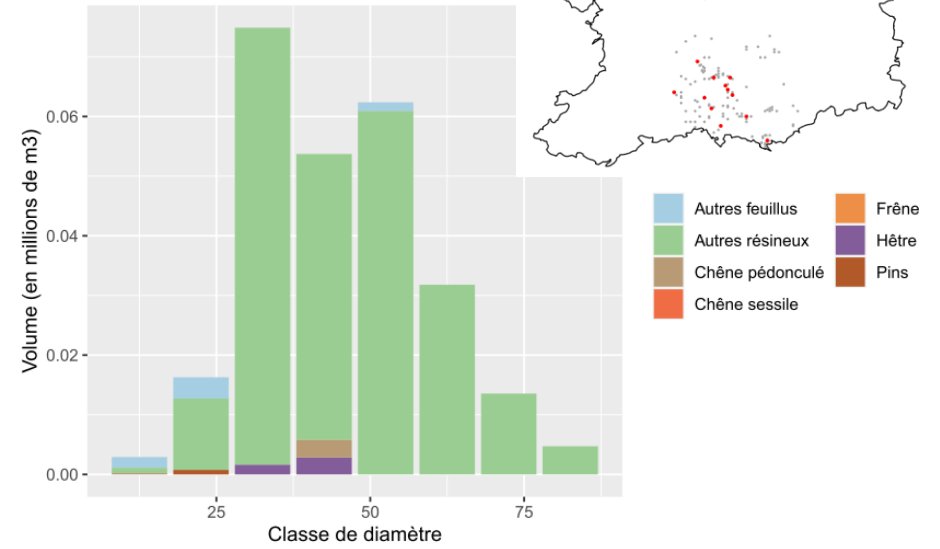
Frêne



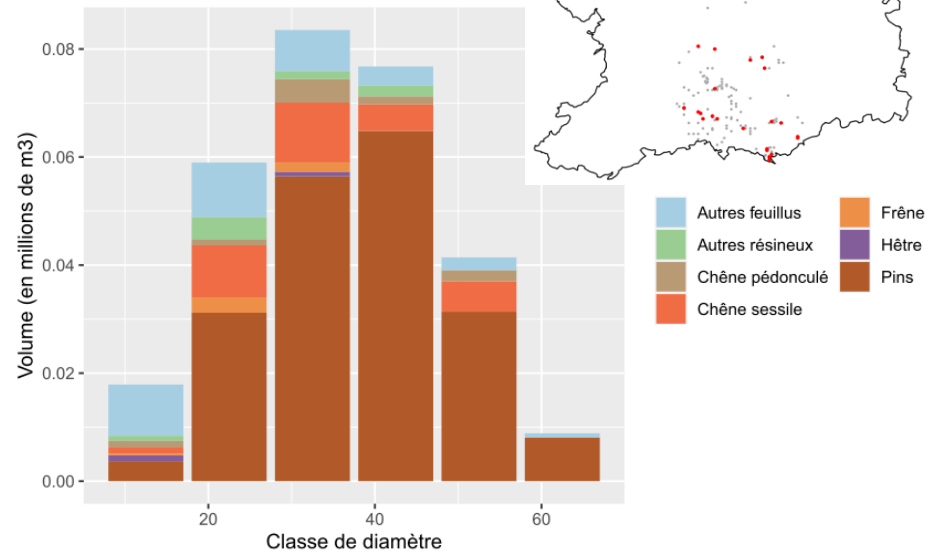
Autres feuillus



Autres résineux



Pins



Annexe 3 – Principaux résultats par strate cartographique

Strate cartographique	Ressource actuelle / inventaire PAT 2023-2024						
	Nombre de points	Surface (ha)	Volume bois fort tige (m3/ha)	Volume bois fort total (m3/ha)	Production nette bois fort total (m3/ha/an)	Diamètre quadratique moyen (cm)	Part de résineux (% du volume)
FEU_CHE_0-Inf_TOT : peuplements de chêne, toutes hauteurs	23	1 840 ± 0	207 ± 44	298 ± 59	6.3 ± 1.9	26	9%
FEU_TOT_0-12_TOT : peuplements de feuillus de hauteur < 12 m	11	1 320 ± 580	70 ± 43	101 ± 63	4.4 ± 3.7	15	4%
FEU_TOT_12-15_TOT : peuplements de feuillus de 12 à 15 m de hauteur	14	1 780 ± 630	164 ± 44	236 ± 62	7.6 ± 2.8	19	2%
FEU_TOT_15-18_TOT : peuplements de feuillus de 15 à 18 m de hauteur	18	2 660 ± 550	242 ± 61	356 ± 91	6.5 ± 1.7	24	9%
FEU_TOT_18-Inf_TOT : peuplements de feuillus de hauteur > 18 m	20	2 840 ± 280	259 ± 38	380 ± 55	9.6 ± 1.9	27	8%
MIX_TOT_0-Inf_TOT : peuplements mélangés feuillus-résineux, toutes hauteurs	22	9 10 ± 110	193 ± 57	260 ± 77	11.5 ± 4	24	47%
RES_TOT_0-Inf_TOT : peuplements de résineux, toutes hauteurs	20	1 080 ± 0	243 ± 95	274 ± 100	12.5 ± 4.2	26	90%
Peupleraie	Exclue de l'inventaire du PAT (400 ha)						
HORPAT : forêts hors PAT	Non estimé						
TOTAL	128	12 440 ± 1 060	208 ± 27	295 ± 38	8 ± 1.2	23	16%

Strate cartographique	Projection à 20 ans / scénario tendanciel						
	Volume 2040 bois fort tige (m3/ha)	Volume 2040 bois fort total (m3/ha)	Disponibilités techniques BOP (m3/ha/an)	Disponibilités techniques BIBE (m3/ha/an)	Part de résineux (% des dispo)	Stockage CO2 forêt et produits (tCO2eq/ha/an)	Substitution CO2 (tCO2eq/ha/an)
FEU_CHE_0-Inf_TOT : peuplements de chêne, toutes hauteurs	234	336	2,3	3,8	19%	2,6	3,5
FEU_TOT_0-12_TOT : peuplements de feuillus de hauteur < 12 m	179	249	0,5	2,5	6%	9,2	1,7
FEU_TOT_12-15_TOT : peuplements de feuillus de 12 à 15 m de hauteur	222	322	1,3	4,0	2%	5,7	3,0
FEU_TOT_15-18_TOT : peuplements de feuillus de 15 à 18 m de hauteur	297	433	2,1	4,4	14%	4,3	3,8
FEU_TOT_18-Inf_TOT : peuplements de feuillus de hauteur > 18 m	284	420	2,8	5,6	12%	3,3	4,8
MIX_TOT_0-Inf_TOT : peuplements mélangés feuillus-résineux, toutes hauteurs	310	401	2,9	3,9	62%	9,4	4,3
RES_TOT_0-Inf_TOT : peuplements de résineux, toutes hauteurs	368	446	4,9	4,5	84%	11,1	6,0
Peupleraie	Exclue de l'inventaire du PAT (400 ha)						
HORPAT : forêts hors PAT	Non estimé						
TOTAL	269	379	2,3	4,3	24%	5,5	3,9

Strate cartographique	Projection à 20 ans / scénario de gestion accrue						
	Volume 2040 bois fort tige (m3/ha)	Volume 2040 bois fort total (m3/ha)	Disponibilités techniques BOP (m3/ha/an)	Disponibilités techniques BIBE (m3/ha/an)	Part de résineux (% des dispos)	Stockage CO2 forêt et produits (tCO2eq/ha/an)	Substitution CO2 (tCO2eq/ha/an)
FEU_CHE_0-Inf_TOT : peuplements de chêne, toutes hauteurs	218	315	2,5	4,2	17%	1,2	3,9
FEU_TOT_0-12_TOT : peuplements de feuillus de hauteur < 12 m	165	229	0,7	3,1	6%	7,9	2,1
FEU_TOT_12-15_TOT : peuplements de feuillus de 12 à 15 m de hauteur	194	283	1,7	5,1	2%	3,2	3,8
FEU_TOT_15-18_TOT : peuplements de feuillus de 15 à 18 m de hauteur	286	421	2,3	4,6	14%	3,5	4,0
FEU_TOT_18-Inf_TOT : peuplements de feuillus de hauteur > 18 m	273	409	2,9	5,8	12%	2,6	5,0
MIX_TOT_0-Inf_TOT : peuplements mélangés feuillus-résineux, toutes hauteurs	306	395	3,0	4,1	60%	9,0	4,4
RES_TOT_0-Inf_TOT : peuplements de résineux, toutes hauteurs	374	452	4,5	4,5	82%	11,3	5,7
Peupleraie	Exclue de l'inventaire du PAT (400 ha)						
HORPAT : forêts hors PAT	Non estimé						
TOTAL	256	363	2,5	4,7	23%	4,5	4,2

Annexe 4 – Principaux résultats par domaine d'étude

Domaine d'étude		Ressource actuelle / inventaire PAT 2023-2024						
		Nombre de points	Surface (ha)	Volume bois fort tige (m3)	Volume bois fort total (m3)	Production nette bois fort total (m3/an)	Diamètre quadratique moyen (cm)	Part de résineux (% du volume)
Chêne pédonculé - Chênaies (ess. princ.)	avec DGD	30	3 140	210 000	319 000	6 700	25	5%
	sans DGD			408 000	621 000	11 200		
Chêne sessile - Chênaies (ess. princ.)	avec DGD	18	2 030	194 000	271 000	5 300	25	4%
	sans DGD			315 000	437 000	8 900		
Hêtre - Hêtraies (ess. princ.)	avec DGD	12	1 430	85 000	128 000	4 100	23	4%
	sans DGD			219 000	329 000	6 900		
Frêne - Frênaies (ess. princ.)	avec DGD	12	1 400	75 000	110 000	3 500	23	1%
	sans DGD			178 000	259 000	5 900		
Autres feuillus - Peuplements d'autres feuillus (ess. princ.), dont bouleau et érable	avec DGD	21	2 460	86 000	129 000	5 700	18	1%
	sans DGD			270 000	403 000	9 700		
Pins - Pinaies (ess. princ.)	avec DGD	22	1 220	147 000	188 000	6 400	24	71%
	sans DGD			140 000	182 000	10 800		
Autres résineux - Peuplements d'autres résineux (ess. princ.), dont douglas et épicéa	avec DGD	13	770	151 000	167 000	5 400	31	94%
	sans DGD			109 000	121 000	9 000		
TOTAL		128	12 440	2 586 000	3 664 000	99 400	23	16%

Domaine d'étude		Projection à 20 ans / scénario tendanciel						Stockage CO2 forêt et produits (tCO2eq/an)	Substitution CO2 (tCO2eq/an)
		Volume 2040 bois fort tige (m3)	Volume 2040 bois fort total (m3)	Disponibilités techniques BOP (m3/an)	Disponibilités techniques BIBE (m3/an)	Part de résineux (% des dispos)			
Chêne pédonculé - Chênaies (ess. princ.)	avec DGD	224 000	344 000	1 600	3 900	4%	68 410	48 230	
	sans DGD	470 000	720 000	2 570	6 220	4%			
Chêne sessile - Chênaies (ess. princ.)	avec DGD	222 000	311 000	1 940	3 110	5%			
	sans DGD	414 000	576 000	2 350	3 700	5%			
Hêtre - Hêtraies (ess. princ.)	avec DGD	84 000	130 000	880	2 230	4%			
	sans DGD	246 000	381 000	1 780	4 340	5%			
Frêne - Frênaies (ess. princ.)	avec DGD	86 000	127 000	930	2 600	1%			
	sans DGD	264 000	386 000	1 590	4 600	1%			
Autres feuillus - Peuplements d'autres feuillus (ess. princ.), dont bouleau et érable	avec DGD	99 000	148 000	1 130	3 550	1%			
	sans DGD	391 000	576 000	2 880	8 980	1%			
Pins - Pinaies (ess. princ.)	avec DGD	270 000	340 000	2 380	3 220	74%			
	sans DGD	273 000	344 000	2 190	2 780	78%			
Autres résineux - Peuplements d'autres résineux (ess. princ.), dont douglas et épicéa	avec DGD	135 000	153 000	4 630	3 110	94%			
	sans DGD	162 000	181 000	1 960	1 320	94%			
TOTAL		3 342 000	4 717 000	28 810	53 660	24%	68 410	48 230	

Domaine d'étude		Projection à 20 ans / scénario de gestion accrue						Stockage CO2 forêt et produits (tCO2eq/an)	Substitution CO2 (tCO2eq/an)
		Volume 2040 bois fort tige (m3)	Volume 2040 bois fort total (m3)	Disponibilités techniques BOP (m3/an)	Disponibilités techniques BIBE (m3/an)	Part de résineux (% des dispos)			
Chêne pédonculé - Chênaies (ess. princ)	avec DGD	214 000	335 000	1 740	4 000	5%	55 430	51 890	
	sans DGD	447 000	695 000	2 920	6 610	5%			
Chêne sessile - Chênaies (ess. princ)	avec DGD	201 000	280 000	2 380	3 860	3%			
	sans DGD	396 000	551 000	2 740	4 310	6%			
Hêtre - Hêtraies (ess. princ.)	avec DGD	72 000	114 000	980	2 680	3%			
	sans DGD	235 000	373 000	1 690	4 560	3%			
Frêne - Frênaies (ess. princ.)	avec DGD	78 000	114 000	1 220	2 960	0%			
	sans DGD	287 000	419 000	1 530	3 650	0%			
Autres feuillus - Peuplements d'autres feuillus (ess. princ.), dont bouleau et érable	avec DGD	97 000	148 000	1 010	3 530	1%			
	sans DGD	326 000	481 000	3 620	11 550	1%			
Pins - Pineraies (ess. princ.)	avec DGD	270 000	340 000	2 380	3 220	74%			
	sans DGD	266 000	335 000	2 320	2 970	78%			
Autres résineux - Peuplements d'autres résineux (ess. princ.), dont douglas et épicéa	avec DGD	154 000	174 000	3 830	2 770	93%			
	sans DGD	143 000	161 000	2 330	1 620	93%			
TOTAL		3 187 000	4 520 000	30 700	58 280	23%	55 430	51 890	