



INSTITUT NATIONAL
DE L'INFORMATION
GÉOGRAPHIQUE
ET FORESTIÈRE



INSTITUT
TECHNOLOGIQUE

PROJECTIONS DES DISPONIBILITES EN BOIS ET DES STOCKS ET FLUX DE CARBONE DU SECTEUR FORESTIER FRANÇAIS

Rapport d'étude

Mai
2024



© Arnaud Bouissou / Terra

Auteurs

IGN : Claire BASTICK, Antoine COLIN, Henri CUNY

FCBA : Alain BAILLY, Alain BERTHELOT, Marin CHAUMET, Gérard DEROUBAIX, Mouchira LAHIANI, Philippe RUCH, Lucile SAVAGNER, Estelle VIAL

Une étude soutenue par le MASA, le MTECT, l'ADEME, FCBA et l'IGN



Table des matières

1	INTRODUCTION	6
1.1	Contexte de l'étude	6
1.2	Objectifs de l'étude et méthode.....	7
1.3	Périmètre des projections	8
1.4	Principes généraux des projections.....	9
2	DESCRIPTION ET PRINCIPALES HYPOTHESES DES SCENARIOS SIMULES	12
2.1	Plan de simulation	12
2.2	Scénarios d'effets du climat	13
2.3	Scénarios du plan de renouvellement	14
2.4	Scénarios de gestion	16
2.5	Scénario des flux dans la filière	18
2.6	Scénario d'évolution de la demande	21
3	IMPACTS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE ET ADAPTATION DES FORÊTS.....	23
3.1	Une grande sensibilité des stocks et des flux aux effets du changement climatique	23
3.2	Les fortes incertitudes des effets du climat sur les forêts	25
3.3	Le temps long de l'impact des stratégies publiques d'adaptation	26
4	EVOLUTION DE L'OFFRE ET DE LA DEMANDE EN BOIS.....	30
4.1	Des visions contrastées de l'évolution de la gestion et de la récolte de bois	30
4.2	Les conditions d'une augmentation de la récolte de bois en forêt	33
4.3	L'enjeu fort de la valorisation des produits accidentels	36
4.4	Une évolution de la demande dépendante des marchés de destination finale des produits bois	39
4.5	Une adéquation de la récolte à la demande variable selon les scénarios.....	41
4.6	Augmenter l'offre industrielle des produits bois pour limiter les importations.....	45
5	BILAN CARBONE DE LA FILIERE FORÊT-BOIS.....	49
5.1	Les différentes composantes du bilan carbone de la filière forêt-bois	49
5.2	Bilan carbone de l'amont forestier	50
5.2.1	Le stockage dans la biomasse vivante en forêt est sensible aux effets du climat et de la gestion .	50
5.2.2	Le bois mort aurait un effet tampon peu durable dans le stockage de carbone en forêt	53

5.2.3	Les sols : un puits de carbone actif mais empreint d'incertitudes	53
5.3	Bilan carbone de la filière aval.....	54
5.3.1	Les usages actuels se caractérisent par une valorisation des feuillus essentiellement en énergie pour l'usage domestique et des résineux principalement en matériau.....	54
5.3.2	Une augmentation du stockage et de la substitution en aval associée à l'augmentation de la récolte	56
5.3.3	L'utilisation de la récolte additionnelle en matériaux, la diminution du déclassé du BO, et le recyclage, permettent d'améliorer le bilan carbone aval	59
5.3.4	Des coefficients de substitution toujours favorables au bois mais décroissants avec la décarbonation des secteurs concurrents et très sensibles à la source d'énergie substituée	63
5.4	Bilan carbone intégré du secteur forêt-bois.....	64
5.4.1	Les bilans totaux au niveau forêt-bois demeurent encore positifs à court terme	64
5.4.2	Les effets des choix actuels sur le bilan carbone ne sont visibles qu'à long terme	69
5.5	Les incertitudes associées au calcul du bilan carbone.....	69
6	CONCLUSIONS GENERALES.....	71
6.1	Une complémentarité amont-aval essentielle pour maximiser le bilan carbone forestier.....	71
6.2	Prendre en compte les multiples enjeux sur la forêt et le bois, aux côtés du carbone.....	73
6.3	La nécessité d'une adaptation du secteur forêt-bois au changement climatique pour atténuer l'effet de serre.....	74
6.4	Une prospective avec ses limites, hypothèses et incertitudes renforçant les besoins de recherche, d'acquisition de données et de partage de connaissances	75

Signification des acronymes

ACV : Analyse de Cycle de Vie
ADEME : Agence de la transition écologique
AME : Avec Mesures Existantes
AMS : Avec Mesures Supplémentaires
BACCFIRE : Evaluation des contributions du carbone forestier et des produits Bois à l'Atténuation du Changement Climatique par construction de schémas de Filières génériques
BE : Bois Energie
BI : Bois d'Industrie
BIPE : Bureau d'Informations et de Prévisions Economiques
BLC : Bois Lamellé Collé
BO : Bois d'Oeuvre
CARTOFOB : Module cartographique forêt-bois
CLT : Cross-Laminated-Timber
CNPF : Centre National de la Propriété Forestière
CP : ContrePlaqué
Codifab : Comité professionnel de Développement des Industries Françaises de l'Ameublement et du Bois
Copacel : Union française des industries des cartons, papiers et celluloses
DFCI : Défense des Forêts contre l'Incendie
DROM : Département et Région d'Outre-Mer
EMERGE : Elaboration de Modèles pour une Estimation Robuste et Générique du bois Energie
ETF : Entrepreneurs de Travaux Forestiers
FAO : Food and Agriculture Organization
FBF : France Bois Forêt
FCBA : Institut Technologique Forêt Cellulose Bois-construction Ameublement
GES : Gaz à Effet de Serre
GIEC : Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat
GRECO : Grandes Régions Ecologiques
HDF : High Density Fibreboard
I4CE : Institut de l'économie pour le climat
IFN : Inventaire Forestier National
ILCD : International Life Cycle Data system
IGD : Indicateurs de Gestion Durable
IGN : Institut national de l'information géographique et forestière
INRAE : Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'alimentation et l'Environnement
MARGOT : Matrix model of forest Resource Growth and dynamics On the Territory scale
MASA : Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté Alimentaire
MDF : Medium Density Fibreboard
Mm³ : Millions de mètres cubes de bois
MOBINTER : MOBilisation de Bois en forêt privée : rôle des caractéristiques INDividuelles et TERritoriales
MOPROF-CC : MODélisation de la PROduction des Forêts Françaises dans le contexte du Changement Climatique
MtCO_{2e} : Millions de tonnes d'équivalent CO₂
MTECT : Ministère de la Transition Ecologique et de la Cohésion des Territoires
ONF Office national des forêts
OSB : Oriented Strand Board
PEPR : Programmes et Equipements Prioritaires de Recherche
PNFB : Programme National de la Forêt et du Bois
PP : Panneaux de Particules

PSG : Plan Simple de Gestion

RENECOFOR : Réseau national de suivi à long terme des écosystèmes forestiers

RMQS : Réseau de Mesure pour la Qualité des Sols

SFEC : Stratégie Française pour l’Energie et le Climat

SNAP : Stratégie Nationale pour les Aires Protégées

SNB : Stratégie Nationale Biodiversité

SNBC : Stratégie Nationale Bas-Carbone

TRACC : Trajectoire de réchauffement de Référence pour l’Adaptation au Changement Climatique

TREMI : Travaux de Rénovation Energétique dans les Maisons Individuelles

Définitions utiles

Disponibilités en bois

Les **disponibilités** sont le potentiel de récolte future permis par la ressource forestière d’un territoire, compte tenu de son stade de développement et en application de règles de gestion forestière définies dans un scénario.

Deux types de résultats sont fournis : les **disponibilités brutes**, qui correspondent au volume de bois coupé en forêt dans les projections ; et les **disponibilités techniques**, qui correspondent au volume de bois réellement récolté et exporté de la forêt et valorisable dans la filière. Ce volume est obtenu après déduction des **pertes d’exploitation**, représentant les volumes restant sur le parterre de coupe lors de l’exploitation du fait des purges, des rémanents, etc. Les disponibilités brutes sont ici le plus souvent exprimées en **volume bois fort tige**, représentant le volume de la tige principale du sol jusqu’à une découpe de 7 cm pour les arbres de plus de 7,5 cm de diamètre à 1m30. Les volumes disponibilités techniques correspondent en revanche aux **volumes aériens totaux hors pertes**, comprenant la tige et l’ensemble des branches de l’arbre, desquels les pertes d’exploitation ont été soustraites.

Pour calculer un **taux de prélèvement** en projection, ces disponibilités peuvent être rapportées à la production biologique nette, c’est-à-dire l’accroissement des arbres moins la mortalité.

Stocks et flux de carbone

Par le processus de la photosynthèse les arbres stockent du carbone dans le bois, qui peut ensuite être exporté de forêt pour prolonger le stockage dans les produits bois. La forêt et le bois constituent des **stocks** de carbone et génèrent des **flux** de carbone, correspondant à la variation des stocks sur une année.

Ces flux sont exprimés en tonnes de carbone par an ou tonnes d’équivalent CO₂ par an, et en se plaçant du point de vue de l’atmosphère. Cela signifie, sauf mention contraire, que les valeurs de flux sont **négatives lorsqu’il y a stockage** et **positives lorsqu’il y a déstockage**. On parle de **puits** de carbone, de **pompe** à carbone ou encore de **séquestration** de carbone en cas de stockage de carbone, et de **source** de carbone lorsqu’il y a déstockage.

La **substitution**, qui n’est pas un flux à proprement parler, mais correspond aux émissions de carbone évitées par l’usage du bois à la place d’autres matériaux ou types d’énergies, est également calculée dans l’étude.

Ce rapport synthétique est à destination des décideurs. Il se concentre sur les résultats. Les hypothèses, les méthodes de calcul et les résultats complets sont détaillés dans les annexes.

1 INTRODUCTION

1.1 CONTEXTE DE L'ETUDE

La France s'est fixé des objectifs ambitieux en matière de réduction nette des émissions de gaz à effet de serre (GES). Ceux-ci sont déclinés au travers d'un ensemble de politiques, d'outils législatifs et d'orientations stratégiques dont certains reflètent plus spécifiquement la place essentielle qu'occupent les forêts et les usages du bois dans la lutte contre le réchauffement climatique et la décarbonation de l'économie du fait de son double rôle dans la séquestration de carbone et dans l'évitement d'émissions de GES fossiles par effet de substitution.

La feuille de route « forêt »¹ de la **planification écologique** publiée en décembre 2022² fixe les axes de travail prioritaires sur la forêt et le bois jusqu'en 2030 dans une perspective d'atteinte de la neutralité carbone. L'enjeu d'adaptation des forêts françaises est au cœur des mesures. L'ambition est d'accroître la résilience des peuplements et de les protéger davantage. Le rôle du matériau bois dans la transition écologique et la place de la biomasse dans les énergies renouvelables y sont également rappelés. Cette feuille de route s'articule avec la **Stratégie Française pour l'Énergie et le Climat (SFEC)** qui vise à mettre à jour les objectifs et orientations pour atteindre la neutralité carbone en 2050. Elle se matérialisera par la publication prochaine de la troisième version de la **Stratégie Nationale Bas-Carbone (SNBC-3)**.

Pour accompagner le développement du secteur forêt-bois, favoriser l'émergence de filières bioéconomiques, accroître le rôle d'atténuation du changement climatique permis par la forêt et le bois, et veiller à la durabilité des pratiques de gestion des ressources forestières, **les pouvoirs publics et les acteurs économiques doivent pouvoir s'appuyer sur des états des lieux établis à partir de données, expertises et simulations documentées**. Ces ressources permettent de poser des diagnostics partagés.

A cet effet, la France dispose de l'enquête statistique permanente d'inventaire forestier national (IFN) depuis 1958. Les résultats qui en sont issus délivrent une description précise et contextualisée de l'état actuel et de l'évolution historique des surfaces et des stocks de bois en forêt. Couplées au modèle de projection MARGOT développé de longue date à l'IGN, les données d'inventaire permettent également de simuler, selon différents scénarios, l'évolution future des stocks, des disponibilités en bois-biomasse et des stocks et flux de carbone entrants et sortants des écosystèmes forestiers. En outre, des connexions entre l'amont forestier et des modèles représentant l'aval du secteur permettent d'estimer l'effet global d'atténuation lié à l'activité forêt-bois en France. Cet effet se décompose en deux axes, à savoir la séquestration en forêt et dans les produits bois, ainsi que les émissions évitées par effet de substitution lorsque le bois est utilisé à la place de sources d'énergie ou de matériaux au bilan carbone moins favorable.

Différentes études nationales ont été réalisées, d'une part en 2016 pour fixer les objectifs de récolte du programme national de la forêt et du bois (PNFB) et de la plupart de ses déclinaisons régionales (étude IGN-FCBA-ADEME, 2016)³, d'autre part en 2017 pour évaluer le potentiel d'atténuation de la filière forêt-bois (étude INRAE-IGN de 2017)⁴. Ces études nationales de référence sur le bois et le carbone les plus récentes sont basées sur des

¹ Secrétariat général à la planification écologique, 2023. La planification écologique pour la forêt.

<https://www.gouvernement.fr/upload/media/content/0001/06/94b5555866d658dedc6ae77125b6c8eaf7e1b835.pdf>

² MASA, 2022. Feuille de route "Forêt de la planification écologique". <https://agriculture.gouv.fr/feuille-de-route-foret-de-la-planification-ecologique-une-action-collective-pour-une-foret-protegee>

³ Colin & Thivolle-Cazat, 2016. Disponibilités Forestières Pour l'énergie et Les Matériaux à l'horizon 2035. <https://inventaire-forestier.ign.fr/IMG/pdf/disponibilites-forestieres-pour-energie-materiaux-horizon-2035-rapport.pdf>

⁴ Roux et al., 2017. Quel rôle pour les forêts et la filière forêt-bois française dans l'atténuation du changement climatique ? <https://www.inrae.fr/actualites/quel-role-forets-filiere-foret-bois-francaises-lattenuation-du-changement-climatique>

données initiales datées, avec un point de départ des projections en 2011. Une actualisation est devenue indispensable pour tenir compte de l'accroissement des pressions subies par la forêt française, dont les conséquences sont désormais visibles dans les données IFN.

1.2 OBJECTIFS DE L'ETUDE ET METHODE

L'objectif de l'étude soutenue par le MASA, le MTECT et l'ADEME, est de **simuler selon une gamme de scénarios l'évolution conjointe de la forêt (territoire métropolitain) et du secteur forêt-bois afin d'évaluer la contribution de l'activité forêt-bois nationale à l'atténuation de l'effet de serre au cours de la période 2020-2050**. Les projections sont prolongées jusqu'en 2080, pour mieux évaluer les effets de long terme de certaines politiques forestières (stratégie de renouvellement), l'incertitude des résultats post-2050 étant toutefois bien plus importante.

Les résultats de l'étude concernent des volumes de disponibilités en bois par catégorie d'usages potentiels (bois d'œuvre – BO, bois industrie et bois énergie – BIBE) et des stocks et flux de carbone dans les différents compartiments de l'amont et de l'aval du secteur.

L'étude a été réalisée en partenariat entre l'IGN et FCBA, qui ont mobilisé leurs expertises complémentaires pour traiter toute la chaîne allant de l'amont forestier à l'aval de la filière bois.

Les travaux exploitent les résultats de l'étude méthodologique réalisée par l'IGN en 2022-2023 avec le soutien de l'ADEME, du MASA et du MTECT⁵. Cette étude a apporté des améliorations techniques dans les domaines suivants :

- l'analyse des conditions d'exploitabilité des peuplements : réévaluation de l'accessibilité des peuplements à partir des données collectées par l'IFN, mise en place d'une typologie des zonages de protection de la biodiversité et du patrimoine vis-à-vis de l'exploitation, réflexions sur la méthode de prise en compte de la fertilité des sols dans les projections à l'échelle nationale ;
- la valorisation des bois : définition du BO et du BIBE potentiels, expertise sur les taux de pertes d'exploitation ;
- la définition d'une méthode de scénarisation de la gestion forestière adaptée au modèle statistique MARGOT utilisé dans la présente étude.

Les projections, débutées en janvier 2023, ont été suivies par un comité de pilotage, regroupant les financeurs ADEME, MASA et MTECT, ainsi que des experts techniques de l'ONF, du CNPF, du Citepa, d'I4CE, d'INRAE, autour des membres de l'équipe projet à l'IGN et à FCBA.

Les premiers résultats validés ont été intégrés fin 2023 dans les processus de modélisation ministériels des scénarios de transition énergétique AME (Avec Mesures Existantes) et AMS (Avec Mesures Supplémentaires) de la stratégie française sur l'énergie et le climat (SFEC), ainsi que dans le volet relatif à l'amont forestier de l'étude confiée par FBF, Codifab et Copacel à Carbone4⁶. Inversement, des éléments d'analyse de la demande et des coefficients de substitution issus de l'étude Carbone4 ont été comparés ou intégrés sous forme d'analyse de sensibilité dans la présente étude.

La méthode de projection mise en œuvre utilise notamment le modèle de projection MARGOT, initialisé avec les données IFN les plus récentes et les paramètres définis dans l'étude méthodologique citée plus tôt. Des scénarios d'effets climatiques futurs sur les dynamiques naturelles sont intégrés dans l'étude selon les connaissances

⁵ IGN, 2021. Définition d'une méthode de référence pour les prospectives sur les ressources forestières, les disponibilités en bois et le carbone. Rapport d'étude IGN. Etude soutenue par MASA, MTECT et ADEME.

⁶ FBF, Copacel, Codifab & Carbone 4, 2024. Filière forêt-bois : Scénario de convergence du bouclage bois-biomasse à l'horizon 2050. <https://franceboisforet.fr/2024/02/12/communiqu-e-de-presse-2030-2050-quel-scenario-carbone-pour-la-filiere-foret-bois/>

disponibles (cf. paragraphe 2.2). Un plan de renouvellement pour adapter certains peuplements à risque face au changement climatique est défini et simulé jusqu'en 2080. Des paramètres d'usages des bois et de pertes d'exploitation, des évolutions des conditions d'accessibilité et de mobilisation des bois, en particulier des produits accidentels sont discutés et pris en compte dans la définition de scénarios de gestion, établis de manière concertée avec le comité de pilotage dont les représentants des forestiers publics et privés. De plus, une analyse prospective de la demande en bois est réalisée et les flux de carbone dans le secteur aval sont modélisés afin d'estimer les résultats sur l'ensemble de la filière forêt-bois. L'étude intègre une évaluation des disponibilités en bois et de la contribution future de l'activité forêt-bois à l'atténuation de l'effet de serre, en discutant les freins et leviers de chaque scénario et en dressant les perspectives d'amélioration encore nombreuses (recherche, développement, acquisition de données).

De **nombreuses trajectoires jugées à priori possibles sont analysées dans l'étude, d'une part pour illustrer la gamme de choix et d'évolutions envisageables** dans les domaines politique, économique ou social, **et d'autre part pour intégrer la large part d'incertitudes** sur les impacts de certains phénomènes, notamment le changement climatique. Ces trajectoires ont vocation à tester, de manière prospective, l'impact des évolutions de différents paramètres. Si les effets potentiels de la crise climatique sont bien pris en compte dans ces évolutions, **les scénarios ne sont pas directement reliés aux trajectoires climatiques du GIEC et n'incluent pas de crises conjoncturelles et extrêmes**, comme pourraient l'être des tempêtes majeures ou des méga-feux ou encore des combinaisons d'aléas, par nature imprévisibles et imprédictibles. Il n'a pas été possible de développer ici de nouvelles projections embarquant des combinaisons d'aléas (biotiques, sécheresse, feux) ni de travailler sur des nouveaux scénarios intégrant des événements extrêmes. Les impacts cumulés sont mal connus (effets retards, combinaisons jusqu'ici évaluées sur des cas très restreints de peuplements et donc d'espèces ne permettant aucune généralisation). Des analyses de sensibilité autour de tels événements ont été largement développées et discutées dans l'étude INRAE-IGN de 2017⁷, et les conclusions sur l'impact attendu des trois histoires de crises en cascade proposées à l'époque restent a priori toujours valides.

1.3 PERIMETRE DES PROJECTIONS

Le périmètre géographique de l'étude est celui de la **France métropolitaine**, les DROM ne sont donc pas considérés ici.

Les projections s'appliquent aux **forêts (peupleraies incluses) qualifiées par la FAO de "disponibles pour la production de bois"**, c'est-à-dire dont le terrain n'a pas d'utilisation (espaces de loisirs, pépinières, etc.) ou de conditions physiques pouvant empêcher l'exploitation des bois (ex : parcs, zones inaccessibles, etc.) sans pour autant que ces forêts soient effectivement exploitées ni même gérées à l'heure actuelle. L'étude prend ainsi en compte 95 % de la superficie des forêts de l'hexagone.

Les bosquets, les landes et les haies bocagères ne font pas partie de la forêt et sont donc exclus du champ de l'étude.

Une **approche "producteur" est mise en œuvre pour le calcul du bilan carbone** de la filière forêt-bois, en cohérence avec les méthodes appliquées dans la comptabilité nationale des émissions de GES (cf. rapport du Citepa⁸). C'est donc la provenance des bois récoltés qui compte et non celle des bois consommés. Le volume de bois récolté dans la forêt française est réparti entre les différents types d'usages au prorata des flux de bois observés dans la filière française. Cette hypothèse ne prend pas en compte le fait que les produits fabriqués à partir de la récolte soient consommés en France ou exportés. Les importations de bois ne sont pas incluses dans les frontières du système étudié, ni pour le stockage dans les produits, ni pour le calcul des effets de substitution.

⁷ Roux et al., 2017. Quel rôle pour les forêts et la filière forêt-bois française dans l'atténuation du changement climatique ? <https://www.inrae.fr/actualites/quel-role-forets-filiere-foret-bois-francaises-lattenuation-du-changement-climatique>

⁸ Citepa, 2023. Rapport OMINEA – 20ème édition. <https://www.citepa.org/fr/ominea/>

Compte-tenu des objectifs de l'étude et des outils utilisés, sa résolution est avant tout nationale et les résultats et analyses présentés ici sont valables à l'échelle de la France métropolitaine. Cependant, afin de tenir compte de la diversité des forêts françaises et de la disparité de leur gestion, de nombreuses hypothèses sur l'amont forestier sont fixées au niveau plus fin de "strates" (cf. annexe de la tâche 1), et des niveaux plus détaillés de résultats, régionaux et infra, sont disponibles dans l'application CARTOFOB⁹.

Les projections ont été effectuées à l'horizon 2050 avec un point de départ en 2020. Elles sont déclinées sur trois périodes cibles des orientations stratégiques : d'abord par des résultats en 2030 et 2035 correspondants à des paliers de la SFEC, puis par ceux de 2050 correspondants à l'objectif de neutralité carbone, enfin des résultats en 2080 sont fournis à titre indicatif pour évaluer l'effet de certaines politiques de long terme. Le niveau de confiance des hypothèses diminue avec le temps, et le mode de définition des hypothèses varie lui-même entre les échéances successives avec une part de plus en plus importante au dire d'expert. Les résultats sont produits par périodes moyennes de 5 ans mais ils sont souvent agrégés sur des périodes plus longues afin de lisser les effets conjoncturels des crises et de faciliter la comparaison entre les scénarios.

1.4 PRINCIPES GENERAUX DES PROJECTIONS

Les projections concernent aussi bien les volumes de disponibilités en bois que le bilan carbone de la filière forêt-bois. Elles intègrent l'ensemble de la chaîne amont-aval.

La réalisation de l'étude a été segmentée en neuf tâches techniques, connectées entre elles (cf. figure 1 ci-dessous), dont la méthodologie est détaillée dans les différentes annexes dédiées, et dont les principales hypothèses sont rappelées dans le chapitre 2 du rapport :

1. Initialisation du simulateur (modèle MARGOT) ;
2. Prise en compte de l'effet du climat sur les dynamiques naturelles ;
3. Définition et implémentation d'un plan de renouvellement ;
4. Prospective sur la demande en produits bois ;
5. Prospective sur les conditions d'accès aux ressources ;
6. Evaluation des volumes par usage et des taux de perte d'exploitation ;
7. Modélisation du carbone dans les différents compartiments du système forêt-bois (7.1.1. dans la biomasse vivante et morte, 7.1.2. dans les sols, 7.2. dans la filière bois) ;
8. Définition des scénarios de gestion ;
9. Réalisation des simulations.

⁹ IGN, FCBA, MASA, MTECT, ADEME, 2023. Observatoire de la biomasse – module cartographique forêt-bois.
<https://cartofob.ign.fr/>

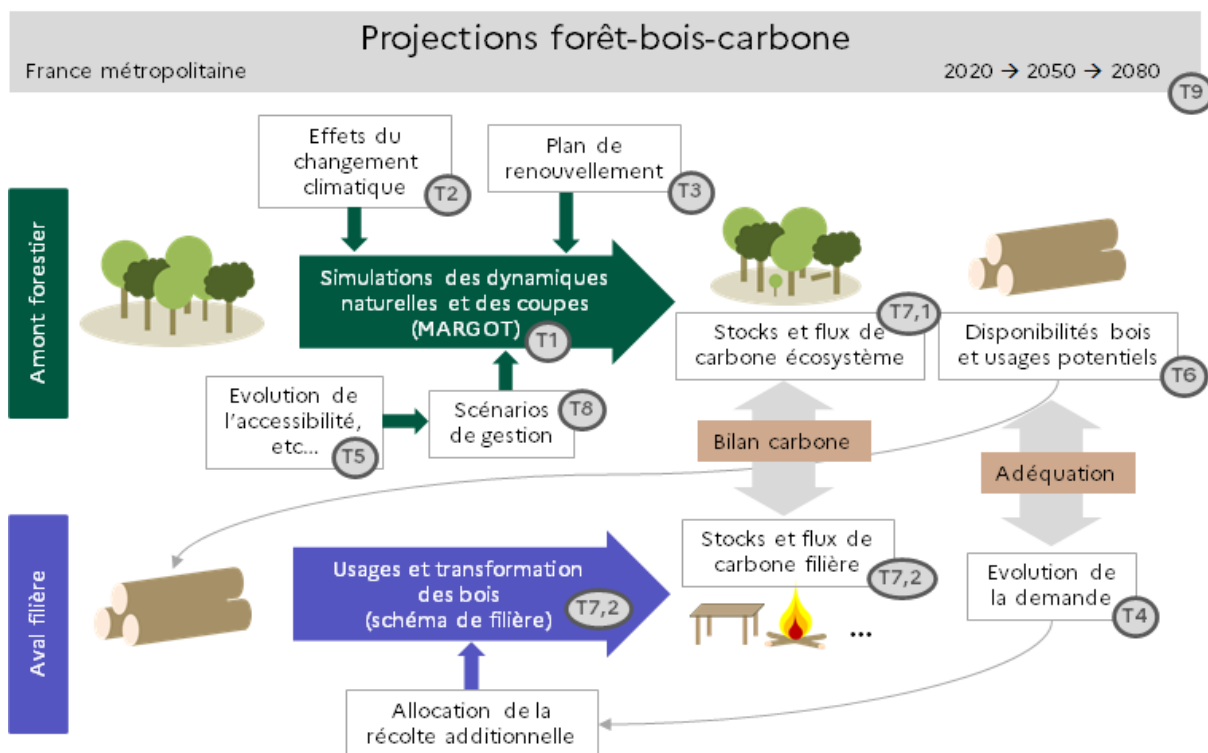


Figure 1 : Schéma d'organisation de la chaîne des travaux de l'étude (les cercles gris représentent les différentes tâches).

Au niveau de **l'amont forestier**, les calculs sont effectués à l'aide d'outils de simulation, et notamment le **modèle MARGOT**, développé à l'IGN dès les années 1980 et ayant fait l'objet d'améliorations techniques et scientifiques importantes ces dernières années (cf. thèse de Timothée Audinot¹⁰). Ces outils sont calibrés et initialisés avec les données de l'enquête statistique d'inventaire forestier national (IFN) qui décrivent la diversité de la ressource et la dynamique de la forêt française. Le fonctionnement des modèles par "domaines d'étude" ou "strates", regroupant des peuplements comparables en matière d'essences, de type de propriété, de conditions de milieu et de sylviculture, permet de spécifier les hypothèses de croissance, de mortalité et de coupe selon les types de forêts. La ressource y est projetée par classe de diamètre ou d'âge (pour les peupleraies, accrus et plantations) et par classe de densité afin de prendre en compte l'évolution de la maturité des arbres ainsi que le phénomène de densification progressif des forêts françaises. La description du fonctionnement de ces modèles, et des "strates" qui leur sont associées, font l'objet de l'annexe de la tâche 1.

Si les cycles longs des forêts rendent ce type de simulation empirique robuste pour projeter une tendance de court ou moyen terme, la crise actuelle et le contexte du changement climatique nécessitent de fixer des hypothèses additionnelles d'évolution des dynamiques naturelles, qui sont détaillées dans l'annexe de la tâche 2. L'évolution du climat engendre également une évolution des pratiques de gestion des forêts, prise en compte dans l'étude à travers différents scénarios de gestion décrits en annexe de la tâche 8, eux-mêmes en partie dépendants de choix économiques ou politiques, comme les investissements en matière d'accessibilité des forêts (cf. annexe de la tâche 5) ou de renouvellement des peuplements (cf. annexe de la tâche 3).

Les impacts des scénarios d'effet du climat et des politiques d'adaptation de la forêt sont développés dans le chapitre 3. Cependant, la prise en compte de ces facteurs présente encore de nombreuses limites, également développées dans le chapitre 3, dont les incertitudes fortes sur les effets du climat à large échelle et sur les outils

¹⁰ Audinot, 2021. Développement d'un modèle de dynamique forestière à grande échelle pour simuler les forêts françaises dans un contexte non-stationnaire. <https://hal.univ-lorraine.fr/tel-03587619>

de projection à résolution nationale ou régionale qui ne peuvent intégrer qu'une vision simplifiée de la gestion (peu de changement d'essence, pas d'itinéraires sylvicoles explicites...).

Les **disponibilités en bois simulées dans le volet amont de l'étude alimentent le volet aval afin de calculer les flux et stocks de carbone suivant les différents types de produits bois**. L'état actuel de la filière de transformation des bois est décrit au niveau national. Les volumes de bois entrants y sont répartis selon leurs usages potentiels (cf. annexe de la tâche 6) et selon différents scénarios d'allocation alternatifs. Ces scénarios visent à tester une adéquation des usages plus ou moins forte à l'évolution future de la demande. L'analyse prospective de la demande effectuée dans cette étude (cf. annexe de la tâche 4) constitue une tâche indépendante du calcul des disponibilités en bois, l'objectif étant ici de confronter les différents résultats d'offre basés sur les scénarios de gestion avec ceux de la demande en produits bois. Ces résultats d'offre et de demande en bois sont développés et analysés dans le chapitre 4 du rapport.

Au-delà des volumes de bois issus des différentes projections, les modélisations de cette étude cherchent à représenter l'évolution probable du bilan carbone de la forêt et de la filière bois et du potentiel d'atténuation du changement climatique de l'activité forêt-bois. Les simulations, associées à différents coefficients ou durées de demi-vie, dont les hypothèses sont détaillées dans les annexes des tâches 7.1 et 7.2, fournissent une estimation à différentes dates des stocks et des flux de carbone dans les différents compartiments de l'écosystème et des secteurs de la filière. La séquestration carbone dans l'écosystème forestier, le stockage dans les produits bois ainsi que les effets substitution à l'horizon 2050 (voire 2080), sont présentés et analysés dans le chapitre 5 du présent rapport.

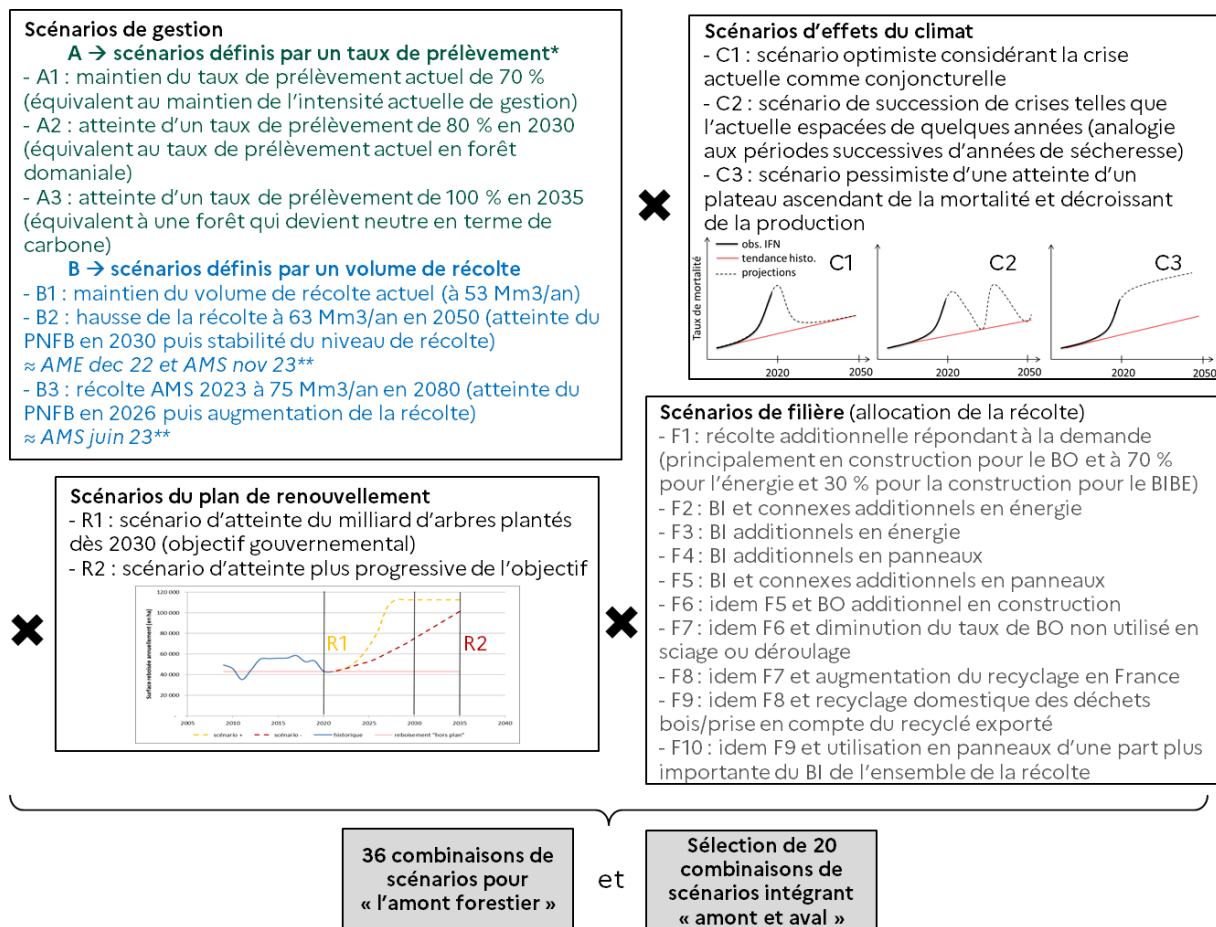
La présente étude intègre les connaissances scientifiques opérationnelles les plus récentes, mais pointe également les nombreuses incertitudes actuelles renforçant le besoin de travaux de recherche sur certains sujets. Elle relève donc du champ de la prospective et ses résultats ne sont pas des prévisions. Le nombre important de scénarios illustre autant de trajectoires possibles d'évolution de la forêt et de la filière bois. Ses résultats, détaillés dans l'annexe de la tâche 9, ont vocation à accompagner les décideurs publics et privés aux échelles nationales et régionales dans leurs prises de décisions en ce qui concerne les usages futurs du bois tout en intégrant le potentiel d'atténuation des effets du changement climatique offert par le secteur.

2 DESCRIPTION ET PRINCIPALES HYPOTHESES DES SCENARIOS SIMULES

2.1 PLAN DE SIMULATION

Afin de simuler une large gamme de trajectoires prenant en compte les évolutions possibles et les effets conjugués des impacts du climat, du plan de renouvellement, des pratiques de gestion et des usages dans la filière bois, différents scénarios ont été construits puis croisés. **Au total, les résultats de 36 combinaisons de scénarios pour l'amont forestier et d'une vingtaine de scénarios intégrés amont-aval ont été calculés** (cf. figure 2), auxquels s'ajoutent des analyses de sensibilité sur certains paramètres (coefficients de substitution, taux de pertes, part de récoltes sanitaires). Les principales hypothèses et la philosophie des différents scénarios sont exposées dans les paragraphes suivants, mais décrites plus en détail dans les annexes respectives.

Figure 2 : Schéma des différents scénarios et combinaisons de scénarios de l'étude



* Scénarios théoriques, la gestion n'étant pas directement pilotée par un taux de prélèvement au niveau national

** Scénarios SFEC

2.2 SCENARIOS D'EFFETS DU CLIMAT

La méthodologie d'implémentation et les hypothèses de définition des scénarios d'effets du climat sont détaillées en annexe de la tâche 2.

L'évolution récente et future du climat augure une hausse des températures avec davantage d'épisodes caniculaires et une augmentation des épisodes de sécheresse. Ces changements ont des effets sur les écosystèmes forestiers, tant du point de vue de la croissance des arbres, dépendante de la durée de végétation, de la vitesse de croissance durant la saison de végétation, des réserves d'eau disponibles, etc., que du point de vue de l'état de santé et de la mortalité des arbres. Les dépérissements d'origine biotique ou abiotique sont en effet influencés par les sécheresses ou encore l'augmentation de certains risques comme les incendies.

Si le lien entre le changement climatique et les dynamiques forestières ne fait aucun doute, et est déjà illustré par l'explosion récente de la mortalité en forêt (conjoncturelle à l'anomalie de sécheresse et de température depuis 2015¹¹), il est encore très difficile de relier de façon quantitative la variation de croissance et la surmortalité des arbres aux paramètres climatiques typiques qui varient dans les scénarios du GIEC. D'une part, la déclinaison en paramètres climatiques et la régionalisation de ces scénarios de réchauffement constituent une source d'incertitude et présentent des biais dans leur capacité à reproduire les observations actuelles et passées. D'autre part, le couplage des projections de dynamiques naturelles à large échelle avec des modélisations à base de processus explicitement pilotés par le climat, tel que cela a été effectué lors de l'étude INRAE-IGN de 2017¹² ou du projet MOPROF-CC¹³, présente encore de nombreuses limites. Cela est notamment rendu complexe par la grande diversité des peuplements forestiers présents à l'échelle nationale, alors que les modèles n'étudient souvent que des essences pures. Une autre difficulté de ces approches est celle de l'intégration des phénomènes d'adaptation spontanés des arbres ou des effets d'atteinte de seuils de saturation ou de rupture de résistance, encore peu connus dans des conditions environnementales risquant d'être très éloignées de celles de la période récente.

Pour ces raisons, détaillées en annexe de la tâche 2, **les scénarios d'effets du climat intégrés dans l'étude sont des trajectoires construites à partir des tendances récentes d'évolution de la croissance et de la surmortalité observées dans les données IFN et déclinées selon un gradient de sévérité établi à dire d'expert.** Cette expertise a notamment mobilisé des chercheurs INRAE dans le cadre de la tâche 2. Les échanges ont visé à distinguer au mieux la part de mortalité de fond essentiellement liée à la compétition entre jeunes arbres de la surmortalité liée aux crises et aux chocs, puis à intégrer les connaissances les plus à jour sur des évolutions possibles de la mortalité à l'avenir en l'absence de modèle prédictif en capacité de répondre à cette question. Les scénarios d'effets du climat de cette étude ne sont pas explicitement quantifiés par les scénarios de réchauffement du GIEC et donc pas directement reliés à TRACC¹⁴ pour les raisons évoquées précédemment. Ils présentent plutôt une gamme de possibles sur la réaction des forêts au changement climatique.

Ces trois scénarios représentent :

- pour le C1, une évolution plutôt optimiste considérant la crise actuelle comme conjoncturelle mais où la dynamique après le pic de la crise poursuit la tendance historique de hausse légère de la mortalité et de baisse légère de la production ;

¹¹ IGN, 2023. Le mémento de l'inventaire forestier. <https://inventaire-forestier.ign.fr/spip.php?article583>

¹² Roux et al., 2017. Quel rôle pour les forêts et la filière forêt-bois française dans l'atténuation du changement climatique ? <https://www.inrae.fr/actualites/quel-role-forets-filiere-foret-bois-francaises-lattenuation-du-changement-climatique>

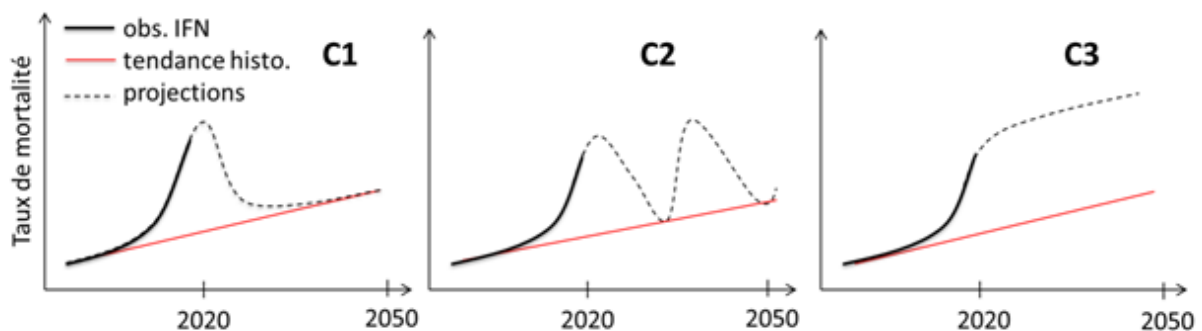
¹³ Jourdan et al., 2023. Projet MOPROF-CC : Modélisation de La Production Des Forêts Françaises Dans Le Contexte Du Changement Climatique. <https://bibliothèque.ademe.fr/produire-autrement/6210-projet-moprof-cc.html>

¹⁴ MTECT, 2023. La Trajectoire de Réchauffement de Référence Pour l'adaptation Au Changement Climatique (TRACC). <https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/document-reference-TRACC.pdf>

- pour le C2, une évolution en une série de crises survenant épisodiquement “par vagues” en lien avec une alternance d’années plus ou moins sèches, correspondant à la dynamique connue des crises historiques induites par les sécheresses ;
- pour le C3, une évolution plutôt pessimiste considérant que la crise actuelle constitue une transition vers un niveau durablement plus élevé de mortalité et plus faible de production, avec une tendance à l’aggravation identique à celle observée avant la crise.

Les trois scénarios considèrent dans tous les cas une aggravation progressive des effets du climat et de ses impacts sur les forêts (cf. figure 3 ci-dessous). La **temporalité des crises simulées**, notamment dans le scénario C2 avec un pic en 2025 et un second en 2045, a été **fixée de façon arbitraire par hypothèse**, ce qui doit être pris en compte lors de l’analyse des résultats.

Figure 3 : Schéma de la philosophie des trois scénarios d’effets du climat sur la mortalité des arbres



NB : La tendance historique correspond globalement à l’évolution de la mortalité de fond (c’est-à-dire hors période de crise majeure) alors que la hausse brutale et récente dans les observations IFN est attribuée à la surmortalité de la crise actuelle.

La philosophie de ces trois scénarios est appliquée de façon conjointe à la croissance et à la mortalité des arbres dans les simulations, mais en supposant une gravité variable suivant les essences et les régions.

Concrètement, des modulateurs de la production et de la mortalité ont été calculés à partir des observations IFN récentes pour représenter les effets du climat en période de crise et hors période de crise. En fonction des périodes et des scénarios, les modulateurs de crise ou hors crise sont appliqués aux paramètres de dynamiques naturelles en projection. Ces modulateurs sont également distingués en un cas “favorable” et un cas “défavorable” utilisés différenciellement suivant un classement par strate de compatibilité climatique des peuplements selon l’outil ClimEssences¹⁵ (cf. annexe de la tâche 2).

2.3 SCENARIOS DU PLAN DE RENOUVELLEMENT

La méthodologie d’implémentation et les hypothèses de définition des scénarios de renouvellement sont détaillées en annexe de la tâche 3.

Un **ambitieux programme de renouvellement forestier, visant à planter 1 milliard d’arbres d’ici 2032** et à renouveler 10 % de la forêt française, a été fixé par le gouvernement¹⁶. De nombreux facteurs organisationnels et climatiques sont susceptibles d’impacter la mise en œuvre de ce plan de renouvellement ainsi que sa réussite sur le long terme. Pour intégrer ces facteurs dans l’étude, **deux scénarios contrastés ont été établis de manière prospective**, reposant sur diverses sources de données et des discussions en groupe de travail avec les acteurs professionnels. Le scénario R1 peut être qualifié d’optimiste, car il additionne les facteurs favorables au

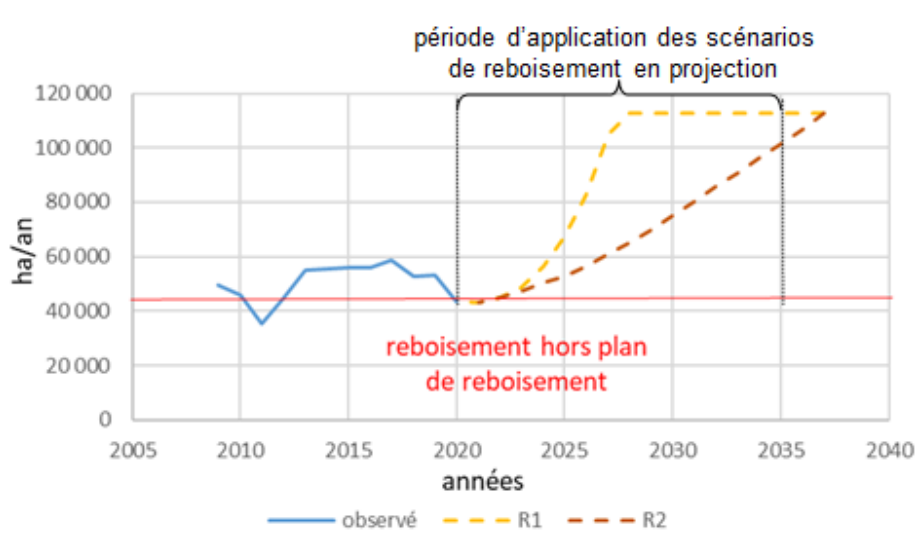
¹⁵ Piboule et al., 2021. Climessences : un outil pour choisir les essences forestières en contexte de climat changeant.

<https://climessences.fr/>

¹⁶ MASA, 2023. Le rapport « Objectif Forêt ». <https://agriculture.gouv.fr/rapport-objectif-foret>

déploiement du plan de reboisement et à la réussite des plantations. A contrario, l'objectif de surface reboisée est atteint plus progressivement dans le scénario R2, qualifié de pessimiste (cf. figure 4).

Figure 4 : Graphique de la surface reboisée annuellement (observée et projetée dans les scénarios R1 et R2)



L'intégration du plan de reboisement dans les modélisations repose sur deux étapes successives :

- 1/ la simulation de coupes dans les peuplements identifiés comme pouvant être renouvelés ;
- 2/ la projection de la croissance et des prélèvements dans les plantations.

L'identification des surfaces prioritaires pour un renouvellement aidé par le programme a été définie selon des critères discutés en groupe de travail et concerne à 89 % des peuplements actuellement dépérissants ou climatiquement vulnérables, le reste correspondant à des peuplements économiquement "pauvres" (cf. définitions dans l'annexe de la tâche 3).

Les essences plantées sur ces surfaces ont été définies à partir de l'analyse régionalisée des dossiers déposés en 2021-2022 des plantations financées par les dispositifs d'aide au renouvellement forestier. La proportion de chaque espèce a été ajustée à dire d'expert selon les caractéristiques de réserve utile en eau du sol, d'altitude et des antécédents sylvicoles des zones identifiées. Pour chaque espèce principale plantée, une espèce de diversification est associée à hauteur de 20 % de la surface.

Les projections de croissance, de mortalité et de prélèvement tiennent compte :

- d'un facteur de réussite des plantations, au-delà du taux de survie, il représente la capacité des peuplements à produire du bois. Il a été défini pour les deux scénarios à partir des éléments disponibles dans des enquêtes et expertises existantes¹⁷ ;
- d'itinéraires sylvicoles et de différents niveaux de productivité (voir annexe de la tâche 3) déterminés à l'aide de sources de données statistiques et de tables de production diverses¹⁸.

¹⁷ Ginisty et al., 1998. Enquête sur la réussite des boisements et reboisements réalisés avec l'aide du Fonds Forestier National et du Budget de l'Etat (1973-1988) - AFOCEL/CEMAGREF.

Boutte et al., 2023. Expertise CRREF - Volet 2 : Analyse des modes de renouvellement en contexte de changement climatique – Thème 2 / Question 3 : Caractérisation et analyse du niveau de réussite des renouvellements forestiers. <https://hal.science/hal-04246488v1/file/rapport-expertise-CRREF-1.pdf>

¹⁸ Fournier et al., 2022. Dendrometric data from the silvicultural scenarios developed by Office National des Forêts (ONF) in France: a tool for applied research and carbon storage estimates. <https://agroparistech.hal.science/hal-03919731/file/s13595-022-01171-7-1.pdf>

IGN, 2023. Données de l'inventaire forestier national. <https://inventaire-forestier.ign.fr/spip.php?rubrique226>

Les scénarios du plan de renouvellement présentés dans l'étude concernent les surfaces aidées par le programme sous forme de plantations, mais d'autres types de renouvellements, notamment par régénération naturelle, sont bien pris en compte à travers la gestion "courante" des scénarios de gestion.

Tableau 1 : Tableau résumé des principales hypothèses des deux scénarios du plan de renouvellement

	Scénario R1	Scénario R2
Rythme annuel de reboisements atteint à l'année	2028 (113 000 ha/an 150 000 000 plants/an)	2037 (113 000 ha/an 150 000 000 plants/an)
Reboisement courant à partir de 2020 « hors dispositifs d'aide au renouvellement forestier »	43 000 ha/an (cf. historique constaté des plants produits annuellement)	
Boisements de terres en déprise	1 000 ha/an entre 2020 et 2025 10 000 ha/an à partir de 2025	0 ha/an
Surface (re)boisée entre 2020 et 2035 dans les « dispositifs d'aide au renouvellement forestier »	≈ 600 000 ha (+ 105 000 ha de boisements de terres en déprise)	≈ 375 000 ha
Diversification	Systématiquement 20 % de diversification Toujours en ilots/parquets	
Succès à 10 ans	85 % pour les résineux 75 % pour les feuillus	70 % pour les résineux 50 % pour les feuillus

Pour certaines analyses dans la suite du document, un scénario R0 sans plan de renouvellement a également été simulé sous forme d'analyse de sensibilité. Cependant, ce scénario ne prend en compte que très partiellement le caractère déperissant des peuplements ciblés dans le plan. Ils évoluent de la même façon que les autres peuplements de la strate, rendant optimistes les résultats de ce scénario R0.

2.4 SCENARIOS DE GESTION

La méthodologie d'implémentation et les hypothèses de définition des scénarios de gestion sont détaillées en annexe de la tâche 8. Ces scénarios reposent en partie sur des travaux réalisés en tâche 5 pour évaluer le potentiel d'amélioration de l'accessibilité des forêts.

Les scénarios de gestion sont définis par un niveau de prélèvement de bois fixé à l'échelle nationale, de façon globale, toutes essences, régions et types de propriétés confondues. Il s'agit plutôt de scénarios d'offre, pour lesquels la répartition de la récolte en essences et produits dépend de la ressource présente en forêt et des variations régionales dans les possibilités d'augmentation ou de diminution de la mise en gestion et de l'intensité des coupes. Six scénarios de gestion répartis en deux familles ont été définis, afin de prendre en compte une large gamme d'évolutions des pratiques et de répondre à diverses questions d'analyse (cf. tableau 2).

Dans la première famille (scénarios A), les objectifs de récolte sont définis par un taux de prélèvement en fonction de l'accroissement biologique. Ces scénarios représentent une gestion très réactive visant à préserver un niveau du puits forestier, avec une filière subissant une récolte en quantité variable et tamponnant les effets des crises. Cette famille de scénarios représente donc plutôt des cas d'étude théoriques. Le taux de prélèvement (cf. définition dans le glossaire) de 70 % actuellement observé en moyenne en France résulte d'une part de l'absence de gestion de certaines forêts et d'autre part du caractère encore globalement jeune de la ressource. La gradation des objectifs de prélèvement entre les différents scénarios A tient plus ou moins compte de la maturation de la forêt, ainsi que d'une variation des surfaces gérées activement.

Dans la seconde famille (scénarios B), les objectifs de récolte sont définis par un volume absolu de disponibilités en bois. Cette fois-ci, c'est le puits forestier qui est la conséquence des prélèvements, qui visent alors à satisfaire un niveau total d'approvisionnement donné de la filière, bien que le type de produits, en qualité, en essences et en diamètre, puisse varier en fonction des crises et de l'évolution des peuplements. La récolte actuelle

représente près de 53 Mm³/an de bois, pertes déduites (cf. définition dans le glossaire). Les scénarios B simulent le maintien ou l'augmentation de ce volume de récolte. Des trajectoires de baisse de récolte sont plutôt évalués par les scénarios de la famille A.

Tableau 2 : Table de présentation des objectifs nationaux des six scénarios de gestion

Scénario	Objectif de prélèvement	Questions étudiées	
Scénarios définis par un taux de prélèvement	A1	maintien du taux de prélèvement actuel de 70 %	quel niveau de récolte et d'approvisionnement de la filière si l'on maintient la tendance de capitalisation des forêts et un niveau de puits de carbone forestier proches de l'actuel ?
	A2	atteinte puis maintien d'un taux de prélèvement de 80 % à partir de 2030	quel volume de récolte si l'on augmente de façon réaliste le taux de prélèvement (équivalent à celui observé actuellement en forêt domaniale compte-tenu de l'état de maturité des peuplements), c'est-à-dire en prélevant l'accroissement sur la majeure partie des forêts, tout en conservant un puits de carbone forestier positif au niveau global ?
	A3	atteinte puis maintien d'un taux de prélèvement de 100 % à partir de 2035	quelle récolte maximale lorsque les stocks de bois sur pied stagnent et que le puits forestier s'annule, et quelle contribution résiduelle de la filière au bilan carbone dans ce cas ?
Scénarios définis par un volume de récolte	B1	maintien du volume de récolte actuel à 53 Mm ³ /an	quel bilan carbone et quels types de produits bois si l'on conserve le niveau actuel d'approvisionnement global en bois, en considérant une relative stabilité de la filière forêt-bois ?
	B2	hausse puis stabilité de la récolte à 63 Mm ³ /an à partir de 2035 (<i>≈ objectifs de l'AME* de décembre 2022 et de l'AMS* de novembre 2023, avec un 1er palier équivalent aux objectifs du PNFB</i>)	quels résultats en carbone et volume par produit si l'on suit les objectifs nationaux de mobilisation supplémentaire des bois, en intensifiant la dynamique récente d'augmentation de la récolte pendant une dizaine d'années ?
	B3	hausse progressive de la récolte pour atteindre 75 Mm ³ /an en 2080 (<i>≈ objectifs de l'AMS* de juin 2023</i>)	quel puits de carbone forestier résiduel et quelle contribution de la filière au bilan carbone avec un approvisionnement de la filière en hausse continue, visant à répondre au cas d'une augmentation potentiellement forte de la demande ?

*Scénarios de la SFEC

Certains paramètres sont communs à l'ensemble des scénarios de gestion, comme ceux de l'expansion forestière, qui reprennent les hypothèses fixées au sein des travaux de la SNBC3 (cf. tableau 3), ou ceux de la gestion dans les peupleraies, qui est considérée comme une simple prolongation des pratiques actuellement observées dans ces peuplements.

Tableau 3 : Evolution des surfaces forestières projetées suivant les scénarios

	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050	2055	2060	2065	2070	2075	2080
R1	16,23 Mha	16,59 Mha	16,82 Mha	16,93 Mha	16,98 Mha	17,02 Mha	17,03 Mha	17,04 Mha	17,05 Mha	17,06 Mha	17,08 Mha	17,10 Mha	17,12 Mha
R2	16,23 Mha	16,58 Mha	16,76 Mha	16,83 Mha	16,88 Mha	16,91 Mha	16,93 Mha	16,93 Mha	16,94 Mha	16,96 Mha	16,97 Mha	16,99 Mha	17,02 Mha

NB : La différence entre R1 et R2 est liée aux boisements de terres en déprise (surfaces boisées dans le scénario R1 et laissées à l'abandon sans pour autant passer à la forêt dans le scénario R2), et le reste de l'expansion est considérée sous forme d'accrus. L'ensemble des nouvelles surfaces forestières est exclusivement attribué à la forêt privée.

Ces six scénarios sont croisés avec les trois scénarios d'effets du climat et les deux scénarios de reboisement, impactant d'autant l'évolution et le type de récolte. **Les types d'essences et de diamètres récoltés dépendent de l'état de la ressource sur pied** et des paramètres de prélèvement par strate des scénarios étudiés, influençant de fait la répartition de la récolte entre type de propriété. Etant donné que les usages potentiels et les pertes d'exploitation sont définis par essence et taille des bois (cf. annexe de la tâche 6), les volumes de disponibilités valorisés selon les types de produits bois varient aussi suivant les scénarios de gestion.

Les **disponibilités calculées dans les scénarios de gestion sont la résultante des coupes liées à la mise en œuvre du plan de renouvellement, puis de coupes sanitaires dépendantes des scénarios d'effets du climat, et enfin de coupes de "gestion courante" réalisées dans les peuplements sains**. Les deux premiers types de coupes viennent alimenter en premier les disponibilités et peuvent être considérées comme des récoltes "subies" du fait de la nature des arbres concernés par ces coupes, le plus souvent morts ou dépérissants. La part de produits sanitaires dans la récolte totale dépend donc des scénarios de reboisement et d'effet du climat, mais également du niveau de gestion qui vient impacter le taux de valorisation de ces bois morts ou dépérissants. Les coupes de "gestion courante" viennent d'une certaine façon "compléter" ces coupes sanitaires, s'adaptant en surface et en intensité pour atteindre l'objectif fixé pour chaque scénario de gestion. L'hypothèse est ainsi faite qu'en période de crise, les coupes normalement prévues dans le cadre de la sylviculture classique seront décalées dans le temps afin de mobiliser et valoriser en premier lieu les peuplements touchés par la crise. L'augmentation ou la diminution des coupes de "gestion courante" pour atteindre l'objectif de chaque scénario de gestion n'est pas appliquée de façon identique entre les types de peuplements, chaque strate ayant un potentiel d'intensification ou d'extensification de la gestion différent (cf. annexe de la tâche 8). Ce mode d'implémentation et ces différentes hypothèses ont fait l'objet de discussions avec l'ONF et le CNPF.

Les taux de pertes d'exploitation et les taux de valorisation des bois morts et dépérissants font l'objet d'une analyse de sensibilité, compte-tenu des incertitudes qui leurs sont associées et du phénomène non pris en compte dans les projections faute d'information, à savoir une part de pertes probablement plus importante pour des bois dont l'état sanitaire serait détérioré (cf. chapitre 4.3).

2.5 SCENARIO DES FLUX DANS LA FILIERE

La méthodologie et les hypothèses de calcul des flux dans la filière sont détaillées en annexe de la tâche 7.2.

Un **schéma décrivant les maillons de la filière et leurs interrelations au niveau national (dit "schéma de filière") a été élaboré pour l'année 2019** sur la base de données statistiques et de données issues de la bibliographie (voir la description en annexe de la tâche 7.2). Dix scénarios, nommés F1 à F10 ont été définis (cf. description détaillée au tableau 4), pour évaluer différentes stratégies d'allocation de la récolte projetée dans les produits bois, en se basant à la fois sur ce schéma de filière de 2019 et sur l'évolution de la demande (cf. paragraphe 2.6).

Pour le scénario F1, l'augmentation simulée de la récolte vient satisfaire la demande essentiellement dans le secteur de la construction pour le BO et à 70 % pour l'énergie et 30 % pour la construction pour le BIBE. Il est basé sur le scénario de demande présenté en section 2.6. Ce même scénario **F1 est utilisé pour les scénarios de récolte B1, B2 et B3 pour les 3 scénarios climatiques**. Les scénarios A1 à A3 n'ont pas été étudiés étant donné qu'ils impliquent des variations fortes de récolte d'année en année ce qui n'est pas compatible avec le modèle marché linéaire adopté ici.

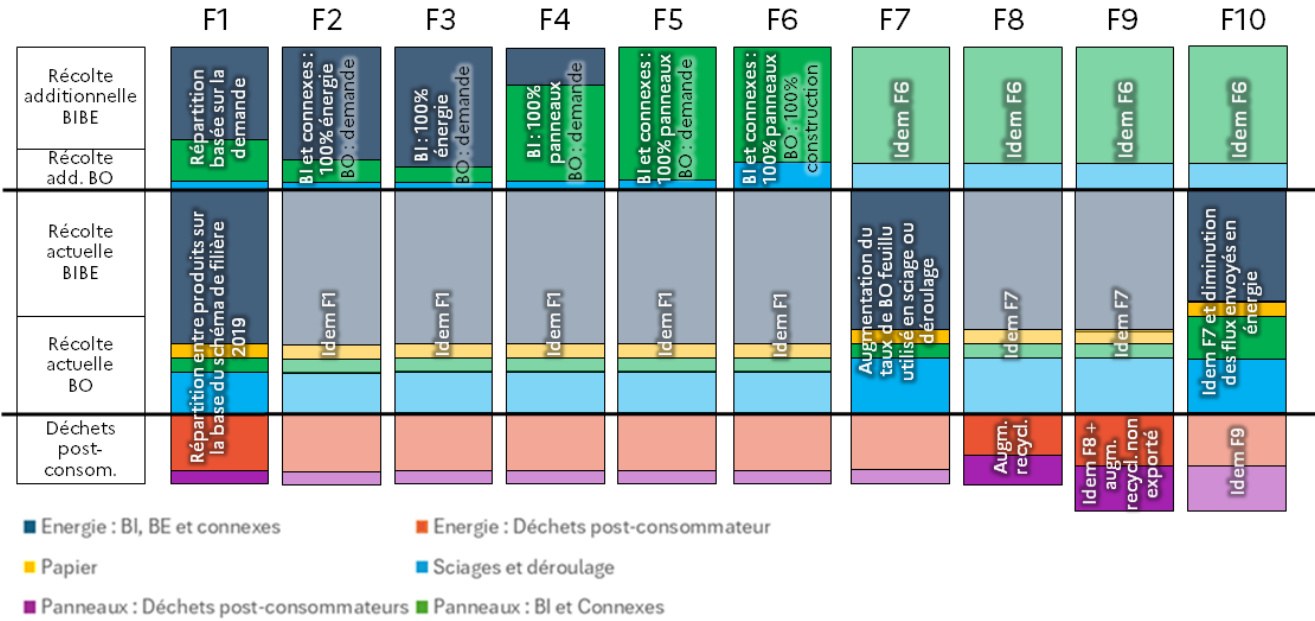
L'évolution du schéma de filière dans le cas d'une augmentation de la récolte correspondant au scénario B2 en climat C2 fait l'objet de plusieurs autres scénarios de filière notés F2 à F10 (cf. tableau 4 et figure 5 ci-dessous).

Pour la majorité de ces scénarios seul le devenir de la récolte additionnelle évolue, la récolte observée en 2019 ne change pas d'usage. Il s'agit dans un premier temps d'élaborer des scénarios proches de la filière actuelle et

donc réalistes à court terme. Le scénario F10 faisant varier l'intégralité de la récolte a également été proposé dans l'objectif de conserver la production d'énergie proche du niveau de 2019, libérant plus de BIBE vers des usages matériels. Ce scénario est inspiré de l'étude d'I4CE de 2023 sur le développement des usages du bois à longue durée de vie¹⁹. La production de panneau associée au scénario F10 est alors très élevée étant donné qu'on suppose que les déchets qui sont recyclés à 75 % en 2050 le sont exclusivement en panneaux de particules. Il est probable que d'ici à 2035 d'autres débouchés que le recyclage en panneau seront trouvés (recyclage des profilés de menuiseries en carrelats, recyclage des déchets de bois massifs en bois lamellé collé ou en CLT, réutilisation/réemploi des panneaux de CLT, utilisation en biochar etc.). On peut également considérer qu'il y a un espace de développement pour la filière panneau en France étant donné que la production allemande par exemple est trois fois plus importante que la production française.

La figure 5 ci-dessous et le tableau 4 suivant précisent les hypothèses de répartition de la récolte globale et additionnelle ainsi que les déchets selon les différents scénarios de filière :

Figure 5 : Schéma des hypothèses de répartition de la récolte suivant les différents scénarios de filière



Pour chacun des scénarios de filière, la répartition détaillée des flux de carbone, la production d'énergie et les volumes de produits sont donnés dans la partie 3 de l'annexe de la tâche 7.2.

¹⁹ I4CE, 2023. Développer les usages du bois à longue durée de vie : regard sur les filières allemande, roumaine et suédoise. <https://www.i4ce.org/publication/developper-les-usages-du-bois-a-longue-duree-de-vie-regard-sur-les-filieres-allemande-roumaine-et-suedoise-climat/>

Tableau 4 : Description des scénarios de filière

Scénarios de filière	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10
Orientation de la récolte "de base" (volume égal à la récolte de 2019)	Répartition constante entre produits sur la base du schéma de filière de 2019									Diminution de 22 % des flux envoyés directement en énergie
Orientation principale des flux de BI ou connexes additionnels (volume supplémentaire récolté par rapport à la récolte de 2019)	Basée sur la demande : En 2035, 71 % énergie, 24 % panneaux en construction et 5 % ameublement ; En 2050, 66 % énergie, 24 % panneaux en construction et 11 % panneaux en ameublement	100 % énergie pour le BI et connexes additionnels	100 % énergie pour le BI additionnels	100 % panneau pour le BI additionnel	100 % panneau pour le BI et connexes additionnels					
Orientation principale des flux de BO additionnels	Basée sur la demande : en 2035, 92 % construction et 8 % emballage, en 2050, 75 % construction et 25 % emballages					100 % construction				
Pourcentage de BO non utilisé en sciage ou en déroulage	Pourcentage de BO potentiel feuillu non utilisé en sciage ou déroulage constant (23 %)						Pourcentage de BO feuillu non utilisé en sciage ou déroulage évoluant vers le pourcentage de BO résineux en 2035, soit 12 %			
Taux de recyclage	35 % en 2020 puis 45 % à partir de 2035							3 5% en 2020, puis 45 % en 2035 puis 75 % en 2050		
Taux d'utilisation domestique du bois recyclé (vs export) ou prise en compte des déchets de bois exportés dans le stock	62 %									100 %

A partir du scénario F7, on considère que le taux de BO potentiel effectivement utilisé en sciages et en déroulage diminue jusqu'à 12 % en 2035. La part de bois d'œuvre potentiel dans les volumes de disponibilités est calculée selon des critères dimensionnels et des critères de qualité externe du bois définis dans l'étude IGN-FCBA de 2019²⁰ (cf. annexe de la tâche 6). L'utilisation du BO potentiel dans d'autres usages que le sciage ou le déroulage provient d'une différence dans l'estimation des volumes par usages potentiels entre l'IGN et l'enquête annuelle "exploitation forestière et scierie" du MASA (cf. explications détaillées dans l'annexe de la tâche 6). D'un côté, les volumes de prélèvements de BO potentiel estimés par l'IGN peuvent être qualifiés d'"optimistes", car la définition de l'usage potentiel BO est basée sur les dimensions et le seul aspect extérieur des tiges en forêt (pas de prise en compte d'éventuels défauts internes, donc). D'un autre côté, il est possible que l'enquête du MASA ne reflète pas la totalité de la récolte française de bois d'œuvre, étant donné qu'il s'agit d'une enquête déclarative. Le manque de débouchés localement et une qualité finalement incompatible avec les usages attendus du bois peuvent également être à l'origine du décalage.

L'utilisation préférentielle du bois en matériau (scénario B2_R1_C2_F4 et les suivants par rapport à B2_R1_C2_F1) ne diminue pas significativement la mise à disposition d'énergie (123 TWh contre 133 TWh, voir les tableaux de la section 3 de l'annexe 7.2). En effet, elle permet de générer des co-produits et des déchets en fin de vie qui peuvent être utilisés en énergie.

Des analyses de sensibilité ont été menées pour évaluer l'impact à 2035 et 2050 de certains paramètres, notamment une évaluation de l'impact sur l'effet de substitution de la décarbonation des industries concurrentes au bois matériau et énergie.

2.6 SCENARIO D'EVOLUTION DE LA DEMANDE

Les détails de l'analyse prospective de l'évolution de la demande en produits bois est disponible dans l'annexe de la tâche 4.

L'évolution de la demande des marchés des produits à base de bois se base sur plusieurs secteurs à horizon 2050 (cf. détails dans l'annexe de la tâche 4). Pour chaque secteur étudié, un calcul prévisionnel de la demande de bois est réalisé via une étude prospective qui se base sur les hypothèses par secteur suivantes :

- **Le bâtiment** : Le secteur du bâtiment couvre les produits bois utilisés pour la construction neuve et la rénovation. Le scénario de la présente étude prend en compte les bâtiments résidentiels (collectifs et individuels), tertiaires industriels et agricoles. Pour la construction neuve, les produits bois analysés sont ceux pris en compte dans l'étude prospective FCBA-BIPE de 2019²¹ moyennant les mêmes coefficients techniques (transformant les m² de surface construite en m³ de bois utilisé). Pour la rénovation, notre scénario analyse les produits bois utilisés dans les maisons individuelles uniquement, les projections se sont basées sur les données de l'enquête Tremi de 2020²². Pour calculer le volume de bois nécessaire pour la rénovation, les deux actes de rénovation liés au bois ont été pris en compte : isolation fenêtres, volets, portes et isolation toiture, murs et planchers...
- **L'ameublement** : Les sous-secteurs concernés par cette activité sont les meubles de bureau et de magasin (meubles professionnels) et les meubles de cuisines et autres (domestique). Les projections se

²⁰ IGN, FCBA, FBF & MAA, 2019. Réévaluation de La ressource et de la disponibilité en bois d'œuvre des essences feuillues et conifères en France. https://inventaire-forestier.ign.fr/IMG/pdf/fcba_ign_etude_bo_france_rapport_version_revisee.pdf

²¹ Donadiou de Lavit et al., 2019. Etude prospective : Evolution de la demande finale du bois dans la construction, la rénovation et l'aménagement des bâtiments. BIPE, FCBA pour CODIFAB, FBF, ADEME, CSF Bois.

<https://librairie.ademe.fr/urbanisme-et-batiment/3861-etude-prospective-evolution-de-la-demande-finale-du-bois.html>

²² SDES, MTECT, ADEME, 2020. Enquête sur les travaux de rénovation énergétique dans les maisons individuelles (TREMI). <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/enquete-sur-les-travaux-de-renovation-energetique-dans-les-maisons-individuelles-tremi>

sont basées sur la stabilité de la part de marché de l'occasion et des parts d'imports et exports des meubles finis.

- **Les emballages en bois** : L'année de référence des calculs prévisionnels de ce secteur est l'année 2019 en prenant en considération les données de l'étude structurelle sur le marché d'emballage bois²³. Les projections ont pris en compte les fluctuations prévisionnelles des marchés cibles des différents types d'emballages bois étudiés en supposant un taux d'import stable.
- **L'industrie papetière** : Etant donné que le secteur du papier-carton est majoritairement basé sur le recyclage, la production française de pâte à papier n'est impactée que partiellement par la demande en papier-carton. C'est surtout le marché mondial de pâtes à papier qui a un effet significatif sur le marché. Nos projections se sont basées sur les évolutions de fabrication de pâtes à papier estimées par la Copacel qui détient une vision nationale et mondiale de l'industrie papetière.
- **Le secteur du bois énergie** : Le domaine du bois-énergie étant étroitement lié aux réglementations gouvernementales et aux incitations étatiques, notre scénario de demande se base sur les deux scénarios de la Stratégie Nationale Bas-Carbone (SNBC) : le premier scénario (AME) prévoit la continuité de la situation tendancielle avec des mesures existantes. Ainsi le deuxième scénario prend en compte des mesures supplémentaires (AMS) renforçant le cadre réglementaire du secteur des énergies renouvelables, dont le bois énergie.

Cette étude prospective vise à évaluer la proportion de la demande couverte par la production nationale pour chaque secteur et famille de produits (cf. chapitre 4.6). Pour ce faire, elle suppose que le taux de production nationale des produits bois reste constant dans le temps, tout en maintenant des niveaux stables d'importations et d'exportations. Ces hypothèses nous permettent d'estimer la demande supplémentaire que nos marchés pourront générer d'ici 2050.

Comme horizon temporel, la période 2023-2050 a été retenue, avec un palier en 2030. L'année 2019 est prise comme référence pour les comparaisons des volumes et des tendances. Ce choix est fait pour ne pas biaiser les résultats comparatifs avec des données des années 2021 ou 2022, qui sont marquées par l'effet rebond de la crise sanitaire.

Pour chaque secteur, les projections de la demande réalisées ici sont considérées comme le scénario de base de cette étude. Des analyses de sensibilité ont été effectuées pour comparer ce scénario à ceux issus de l'étude « Quel scénario carbone pour la filière forêt-bois ? »²⁴ réalisée par le cabinet Carbone 4 en 2023. Ces deux scénarios sont : le scénario « Pro Techno », où la transition environnementale est basée sur des innovations technologiques, et le scénario « Sobriété », où la transition est principalement basée sur la résilience, grâce aux changements de comportement sociétal.

Cette comparaison offre une mise en regard critique du scénario de demande plutôt « tendanciel » calculé dans la présente étude avec les deux scénarios de l'étude réalisée par le cabinet Carbone 4. Cette vision comparative permet d'anticiper les fluctuations de la demande et ainsi prendre des décisions éclairées quant à l'usage future de l'offre de bois.

²³ GALLILEO, 2021. Etude structurelle sur le marché de l'emballage bois. https://franceboisforet.fr/wp-content/uploads/2021/02/Marche_emballage.pdf

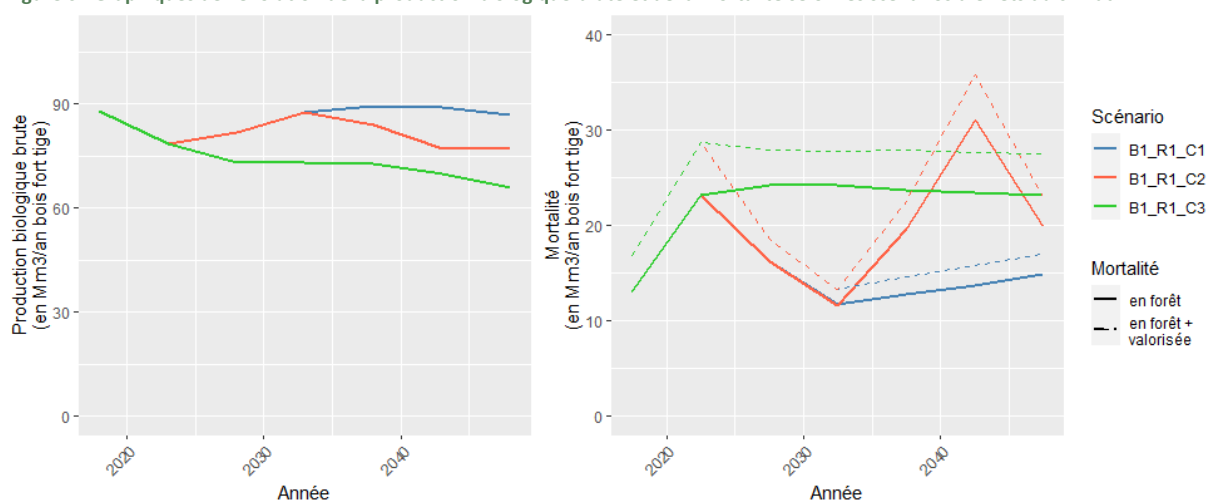
²⁴ FBF, Copacel, Codifab & Carbone 4, 2024. Filière forêt-bois : Scénario de convergence du bouclage bois-biomasse à l'horizon 2050. <https://franceboisforet.fr/2024/02/12/communiqu-e-de-presse-2030-2050-quel-scenario-carbone-pour-la-filiere-foret-bois/>

3 IMPACTS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE ET ADAPTATION DES FORÊTS

3.1 UNE GRANDE SENSIBILITE DES STOCKS ET DES FLUX AUX EFFETS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE

Les scénarios d'effets du climat ont un **impact majeur sur les résultats**. La production biologique brute, dont la contribution au bilan carbone des écosystèmes forestiers est majeure, pourrait varier de -1 à -22 Mm³/an (soit de -1 à -25 % en relatif) entre sa valeur actuelle et la valeur en 2050 selon les scénarios d'effets du climat pour le scénario de gestion B1 et de reboisement R1 (cf. figure 6). Pour la mortalité, la variation projetée de l'ordre de +2 à +10 Mm³/an (soit de +13 à +77 % en relatif), impacte légèrement moins le bilan carbone mais représente, proportionnellement aux volumes concernés actuellement, une évolution spectaculaire de ce flux.

Figure 6 : Graphiques de l'évolution de la production biologique brute et de la mortalité selon les scénarios d'effets du climat



NB : Les résultats sont représentés pour le scénario de gestion B1 et de renouvellement R1. La mortalité est distinguée entre celle restant en forêt et celle valorisée en produits accidentels. Le point de départ des courbes représente l'estimation IFN la plus récente de ces flux.

La crise actuelle, déjà notable dans les résultats IFN récents avec une baisse de la production biologique brute annuelle de l'ordre de 4 millions de m³ bois fort tige en 5 ans et un doublement de la mortalité annuelle en l'espace de 10 ans²⁵, a été retenue comme point de départ de l'ensemble des scénarios d'effets du climat de l'étude. Cette crise impacte fortement les écosystèmes forestiers sur les premières périodes de projection, avec un pic de mortalité et une chute de la production dès le début des simulations (cf. figure 6). Dans l'hypothèse d'une apogée de cette première crise aux alentours de 2025, la capitalisation en cours depuis des décennies (augmentation des volumes de bois sur pied en forêt, cf. figure 7) serait fortement freinée, ce qui contribuerait à la réduction du puits de carbone forestier à court terme.

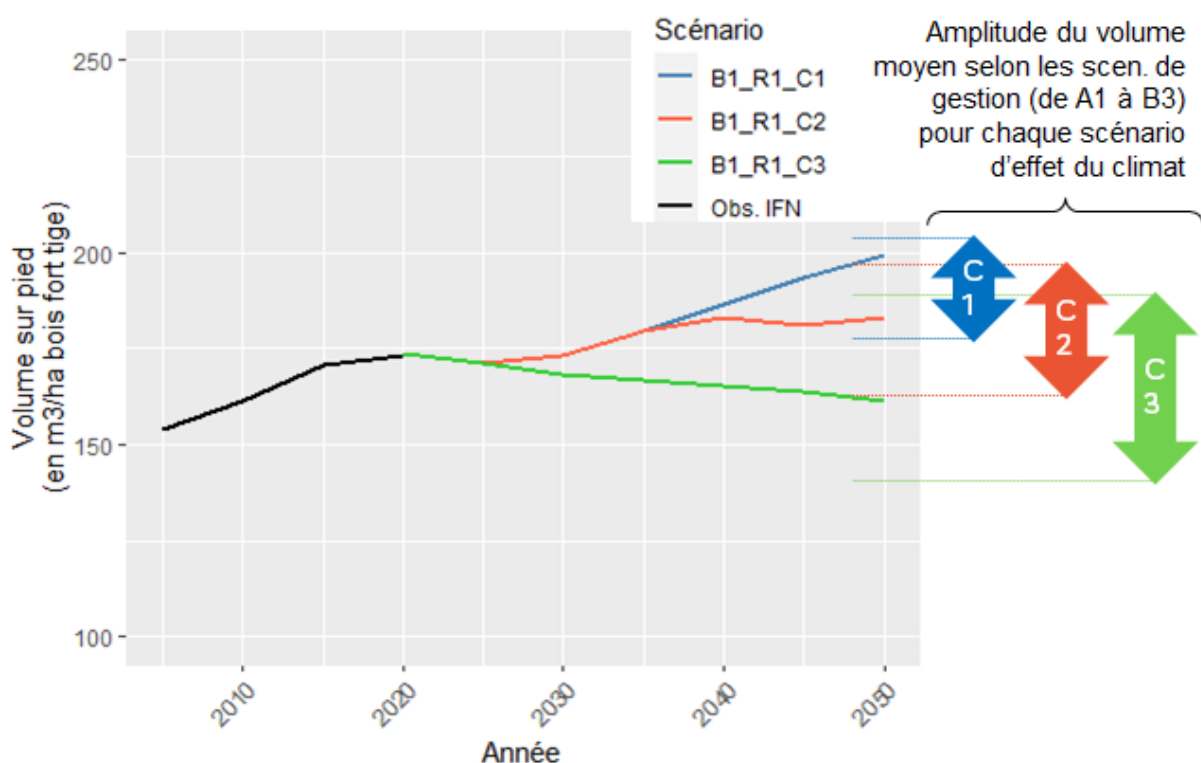
A plus long terme, la dynamique des flux de production et de mortalité est directement liée aux hypothèses de sévérité des scénarios d'effet du climat. Cependant, la légère diminution en absolu des répercussions du scénario C3 à partir de 2035 et l'importance du pic de la seconde crise du C2 (cf. figure 6), alors même que les taux de mortalité du C3 continuent d'augmenter par rapport au C2, reflètent l'effet de la diminution du stock sur pied et donc du potentiel d'arbres pouvant être atteints par une nouvelle sécheresse ou maladie dans un scénario sévère et sans accalmie d'effets du climat. Il en est de même avec des scénarios de gestion induisant une décapitalisation des peuplements. Si les arbres ont déjà été prélevés, le stock de carbone correspondant se trouve dans les produits bois ; si les arbres sont déjà morts auparavant, ce stock de carbone est retourné dans l'atmosphère plus tôt.

²⁵ IGN, 2023. Le mémento de l'inventaire forestier. <https://inventaire-forestier.ign.fr/spip.php?article583>

Le gradient de sévérité envisagé des effets du climat sur les différents flux projetés, se répercute directement sur le volume à l'hectare et *de facto* le bilan carbone. Ainsi **l'amplitude de ce gradient d'effets du climat à l'horizon 2050 équivaut à celle de la gamme des scénarios de gestion projetés pour les stocks sur pied** (cf. figure 7). Les conséquences du changement climatique s'illustrent ici également à travers l'influence des scénarios d'effets du climat sur les réponses des différents scénarios de gestion. Si dans le cas d'une évolution plutôt optimiste des effets du climat, l'impact de la gamme des gestions étudiées est plus faible sur la ressource forestière et les écosystèmes forestiers continuent de se capitaliser et de séquestrer du carbone, dans le cas d'une évolution plutôt pessimiste des effets du climat, les différents scénarios de gestion étudiés ont des conséquences plus diverses sur les peuplements forestiers, avec des scénarios B de hausse de la récolte pouvant entraîner des baisses importantes des stocks en volume et en carbone en forêt (cf. taille des flèches selon scénario climatique dans figure 7, cf. aussi figure 13).

En dehors des effets du changement climatique et à surface forestière constante, le stock moyen de bois sur pied serait amené à se stabiliser à terme compte-tenu du vieillissement des peuplements forestiers. Cet effet est bien pris en compte dans les projections, la maturité des arbres étant un des paramètres du modèle, cependant, la poursuite de la capitalisation dans le scénario C1 et la différence entre les scénarios d'effets du climat illustrent ici l'impact prépondérant des conséquences du changement climatique par rapport à ceux liés la maturation des peuplements sur la dynamique de la ressource forestière à l'horizon temporel de l'étude.

Figure 7 : Evolution du volume sur pied moyen selon les différents scénarios d'effets du climat



NB : Les flèches représentent l'amplitude en 2050 du volume à l'hectare selon les différents scénarios de gestion pour un scénario d'effets du climat. Les données historiques sont issues des observations IFN.

Le scénario C2, dont la temporalité des crises est fixée arbitrairement, illustre la variabilité au cours du temps du stockage de carbone dans les écosystèmes et des disponibilités en bois pour la filière du fait de la survenue successive de crises. Si la vraisemblance de ces crises par vagues est particulièrement réaliste à l'échelle d'essences et de régions données (cf. crise des scolytes ou incendies), l'impact modélisé dans **ce scénario C2 met en exergue les risques d'une offre de bois irrégulière** en quantité (pour les scénarios A) et/ou en types de produits, essences et qualité (pour les scénarios B). En effet, ce scénario se caractérise par des arrivées massives, plus ou moins épisodiques, de bois issus de coupes sanitaires sur le marché, et l'enjeu de valorisation de ces

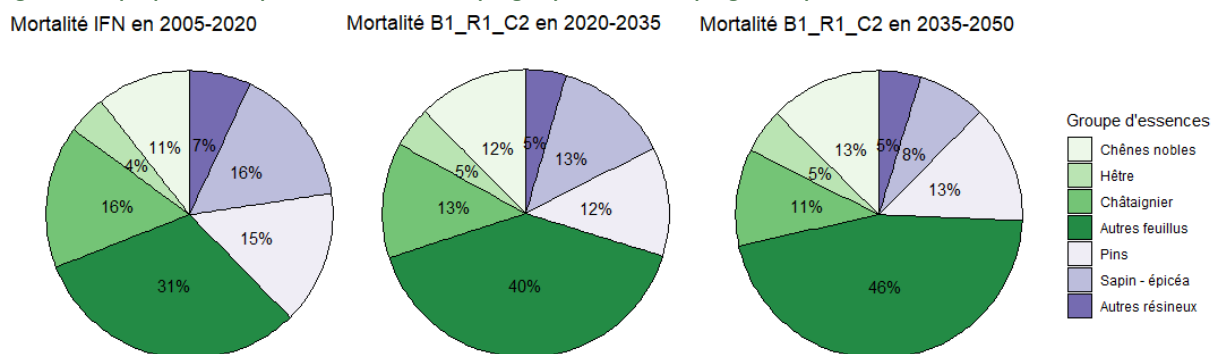
arbres est fort (cf. paragraphe 4.3). Le bilan carbone est également affecté par cette succession de crises, avec des phénomènes de vagues au niveau du stockage en forêt, mais pour lesquels la filière peut jouer un rôle via le stockage carbone de ces récoltes de crises dans les produits bois (cf. chapitre 5). Dans la gamme des scénarios présentés et sous l'influence de la variation des dynamiques naturelles (production brute et mortalité, cf. figure 6), les impacts du climat sur les forêts ont une contribution déterminante sur la séquestration carbone, pouvant faire passer les écosystèmes forestiers du statut de "puits" de carbone (évolution croissante des stocks en forêt) à celui de "source" (baisse des stocks en forêt, cf. figure 7) selon les périodes et les scénarios.

3.2 LES FORTES INCERTITUDES DES EFFETS DU CLIMAT SUR LES FORETS

La forte variabilité et l'amplitude des résultats des scénarios d'effets du changement climatique sur les forêts sont le reflet à la fois de différents futurs possibles en matière d'évolution du climat, mais aussi des nombreuses incertitudes inhérentes à ce type de projections sur la forêt française. Il est effectivement **délicat d'évaluer et de quantifier**, dans les résultats des scénarios C1, C2 ou C3, **le lien entre l'évolution de la température et des précipitations et les variations de croissance et la mortalité des arbres** (cf. annexe de la tâche 2). L'ampleur de la variabilité associée à ces scénarios fixés à dire d'expert et à l'aide des observations IFN récentes, illustre encore une fois la nécessité d'approfondir ce champ de recherche scientifique. La sensibilité des résultats est particulièrement forte sur la production biologique des arbres pour laquelle une tendance même légère à la baisse des taux de passage (cf. modulateurs autour de -1 %/an de l'annexe de la tâche 2) peut entraîner une diminution forte de l'accroissement biologique (jusqu'à -20 Mm³/an en bois fort tige en 2050 entre C1 et C3, cf. figure 6).

Par ailleurs, le changement climatique devrait également influencer sur l'occurrence et l'intensité d'événements extrêmes, comme les méga-feux. Si des crises diffuses et progressives liées au climat ont été fixées et implémentées dans les scénarios simulés, **des événements catastrophiques plus soudains à fort impact** comme les tempêtes ou l'introduction d'un ravageur sur une essence majeure **ne sont ici pas pris en compte**, ouvrant des perspectives de travaux de recherche et d'expertises multidisciplinaires. Cependant, et comme l'illustre déjà le scénario C2, il est probable que ces risques pesant sur la forêt aient des conséquences diverses suivant les scénarios. En effet, le stock sur pied atteint ne serait pas le même au moment de la catastrophe selon les scénarios. Et la capacité de la filière à absorber de tels dégâts dépendrait sans doute de son bon état de fonctionnement, requérant une flexibilité potentiellement acquise par l'expérience d'autres crises et une absence de saturation du marché par d'autres produits sanitaires mal valorisés.

Figure 8 : Graphiques de la répartition de la mortalité par groupe d'essence et par grandes périodes



NB : La mortalité est ici représentée en volume bois fort tige restant en forêt, hors peupleraies, dans les observations IFN historiques et dans le scénario B1_R1_C2 en projection

La dynamique des **effets du changement climatique risque fortement de dépendre des essences selon les régions**, en fonction de l'ampleur des changements auxquelles elles seront confrontées, de leur vulnérabilité et de leur capacité d'adaptation aux différents stress, maladies ou risques. **La démarche de projection est ici**

nationale et peu détaillée par essence, avec l'hypothèse par défaut d'un renouvellement des peuplements à l'identique (hors reboisements du plan des scénarios R1 et R2) et une définition des scénarios d'effets du climat rendue possible uniquement à l'échelle globale. Ces deux hypothèses fortes limitent l'évolution de la composition en essence dans les projections, nécessitant leur prise en compte dans l'interprétation des résultats par essence et dans les axes de perspectives de recherche soulignés par cette étude. Les simulations tiennent compte toutefois de ces différences par essences et régions via la notion de strates, ayant chacune des paramètres initiaux, des dynamiques et des modulateurs d'effets du climat dédiés (cf. annexe de la tâche 1 pour le calcul des paramètres initiaux et annexe de la tâche 2 pour l'intégration des projections ClimEssences dans le calcul des modulateurs). Malgré ce type de prise en compte relativement peu spécifique, les résultats illustrent déjà le fait que les différentes crises pourraient toucher de façon différenciée les essences (exemple de la tendance historique et des vagues 2020-2035 et 2035-2050 du scénario C2 dans la figure 8). La crise actuelle affecte particulièrement l'épicéa. Mais dans quelques décennies la conjonction d'un volume sur pied plus faible de cette essence et de peuplements résiduels plus résistants ou dans des stations plus adaptées, pourrait permettre une forte réduction de la mortalité de cette essence. A l'inverse, des dépérissements sur d'autres essences plutôt épargnées jusqu'à présent pourraient avoir un impact majeur dans les décennies à venir, comme l'exemple des chênes "nobles" dont la mortalité a récemment fortement augmenté et dont le volume représente près du quart de la ressource française. Ces phénomènes illustrent à nouveau la difficulté de suivre une trajectoire de réchauffement dans la construction de scénarios d'effets du climat. Ces questions et connaissances sur la vulnérabilité entre essences et régions, essentielles dans un contexte d'adaptation et de renouvellement des forêts françaises, nécessitent des travaux de recherche complémentaires et une capacité à prendre des décisions dans un cadre incertain, sans doute en diversifiant les réponses et actions apportées et en s'appuyant sur des observations et des expertises locales comme nationales.

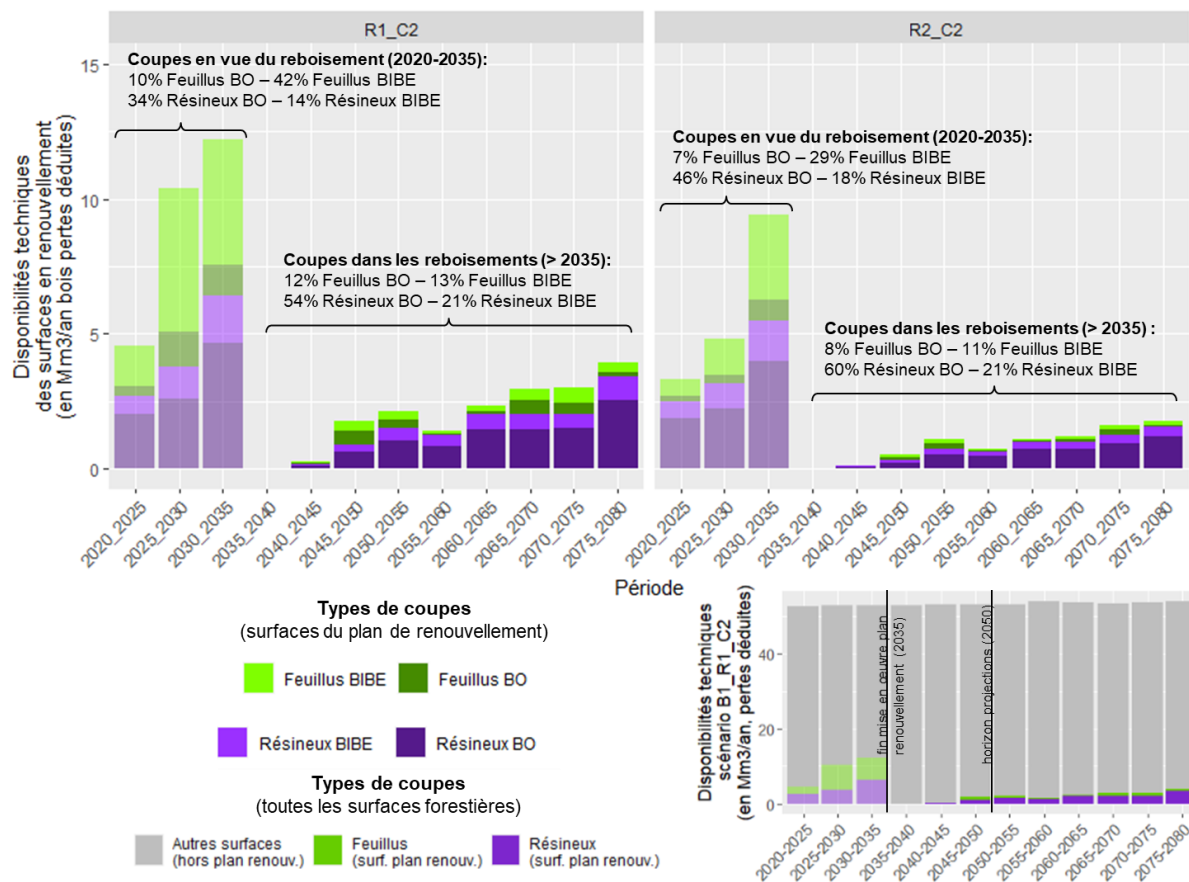
3.3 LE TEMPS LONG DE L'IMPACT DES STRATEGIES PUBLIQUES D'ADAPTATION

Les seuils retenus pour identifier les surfaces à reboiser dans le cadre du plan de renouvellement²⁶ (cf. annexe de la tâche 3) donnent la priorité au renouvellement des peuplements sinistrés et dépérissants (60 % et 65 % des surfaces respectivement pour R2 et R1) et climatiquement vulnérables (25 % des surfaces dans les deux cas), les peuplements économiquement pauvres représentant 15 % et 11 % des surfaces pour respectivement R2 et R1. Dans les deux scénarios ce sont principalement des peuplements d'épicéa commun des grandes régions écologiques (GRECO) Vosges et Jura qui sont ciblés puis, dans une moindre mesure, les peuplements de sapin et de frêne. Le scénario R1, qui conduit finalement au renouvellement de 4 % de la surface forestière française, concerne plus largement toutes les GRECO. Il permet aussi de renouveler des peuplements de chênes et feuillus divers et de boiser 105 000 ha de terres en déprise agricole sur des terrains privés.

En s'appuyant sur les choix d'essences plantées dans le cadre du plan de relance en 2021-2022, 21 espèces sont sélectionnées pour effectuer les reboisements, elles sont résineuses pour 2/3 des surfaces. Le Douglas est principalement utilisé pour renouveler les peuplements résineux alors que le chêne et le pin maritime sont principalement utilisés en substitution des peuplements feuillus. Une sylviculture dynamique leur est appliquée, engendrant dans un premier temps de nombreuses éclaircies avec une visée de production de bois d'œuvre à plus long terme. L'effet du plan de renouvellement est visible sur la qualité de la ressource puisque les volumes récoltés lors de la mise en œuvre du plan (jusqu'à 2035) représentent 135 Mm³ et 90 Mm³ respectivement pour R1 et R2 mais sont pour 50 % du BIBE. Entre 2040 et 2080, la récolte issue des reboisements est de 95 Mm³ et 35 Mm³ respectivement pour R1 et R2 mais atteint quasiment 70 % de BO. La part de résineux dans la récolte issue des peuplements aidés par le plan de renouvellement augmente également sur cette période. Évidemment ces résultats moyens sur la période cachent la tendance de fond, la part ainsi que la quantité de BO étant bien plus forte en 2080 qu'en 2040.

²⁶ MASA, 2023. Le rapport « Objectif Forêt ». <https://agriculture.gouv.fr/rapport-objectif-foret>

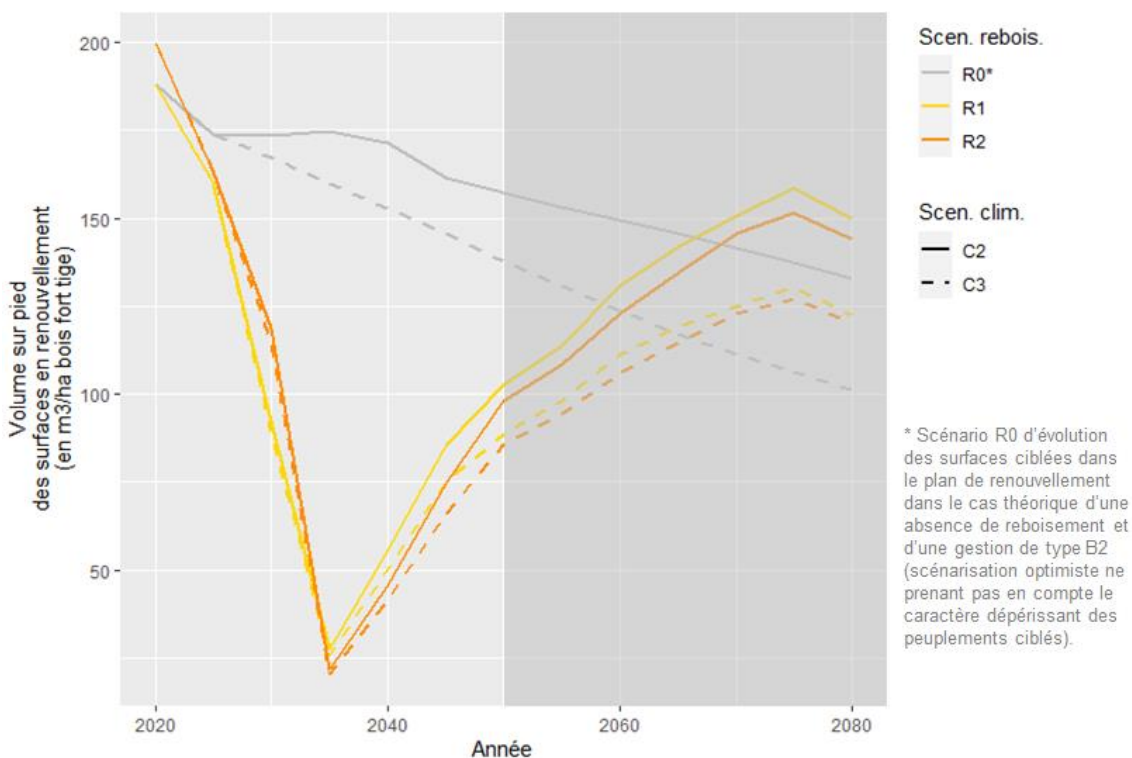
Figure 9 : Evolution des disponibilités et de leur répartition entre essences et qualité sur les surfaces reboisées dans le plan de renouvellement des scénarios R1 et R2



NB : Disponibilités techniques en Mm³/an bois pertes déduites, seules les disponibilités des surfaces liées au plan de renouvellement pour les scénarios R1 et R2 sont présentées dans les graphiques du haut, le graphique du bas les représente en regard de la disponibilités nationales du scénario B1. Les pertes d'exploitation et la qualité potentielle prises en compte sur les disponibilités techniques sont définies sans distinction de l'état sanitaire des arbres (cf. annexe 6 et paragraphe 4.3), alors que le caractère dépérissement de nombreux peuplements en renouvellement amoindrirait sans doute le volume total et la part de BO disponible par rapport aux résultats présentés ici sur les coupes de ces peuplements (périodes de 2020 à 2035).

Les récoltes post-2035 issues des plantations peuvent paraître faibles au regard des volumes mobilisés lors de la phase de renouvellement de 2020 à 2035. Mais d'une part, les coupes de peuplements, majoritairement dépérissants, ciblés dans le plan de renouvellement génèrent des volumes sans doute légèrement surestimés (cf. *nota bene* de la figure 9) et concernent en très grande partie des arbres qui dans tous les cas auraient disparu. D'autre part, les âges de récolte considérés pour les plantations sont au minimum de 50 ans dans les meilleures stations (hors peuplier) (cf. annexe de la tâche 3). Ainsi les disponibilités sur la période 2040-2080 sont principalement le produit des éclaircies alors qu'environ la moitié du volume des peuplements est récolté en fin de révolution, horizon temporel trop éloigné pour cette étude.

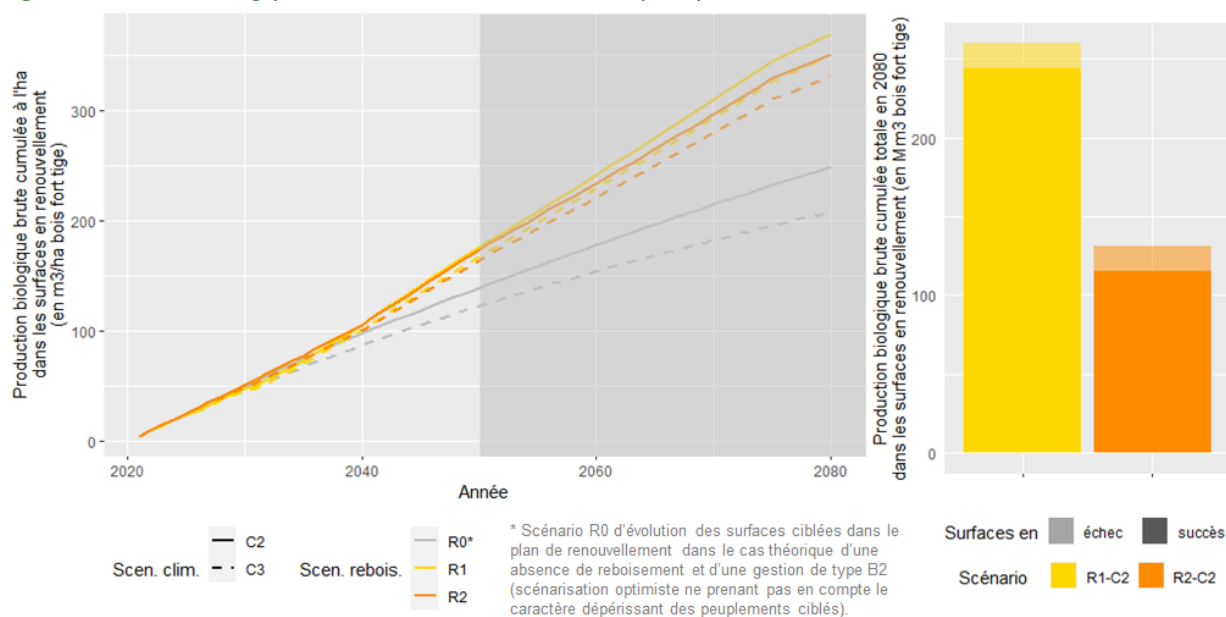
Figure 10 : Evolution du volume sur pied moyen à l'hectare dans les peuplements aidés dans le plan de renouvellement selon les scénarios de renouvellement et les scénarios d'effets du climat sur l'ensemble de la période de projection



Le renouvellement progressif des surfaces concernées jusqu'à 2035 entraîne inévitablement une **phase de décapitalisation du stock** sur pied avant une reconstitution progressive de ce stock (cf. figure 10). Rappelons que les surfaces sélectionnées pour le plan de renouvellement sont pour plus de 80 % des peuplements actuellement déperissants ou à fort risque de le devenir. **L'absence de renouvellement de ces peuplements conduirait également à un déstockage à plus ou moins long terme, mais par mortalité cette fois-ci.** Pour le scénario théorique R0 sans plan de renouvellement, dans lequel cette mortalité des peuplements déperissants est pourtant sous-estimée (cf. figure 10 et paragraphe 2.3), une forte baisse du stock est projetée sur les surfaces concernées conduisant à long terme à un capital sur pied plus faible que dans un scénario d'application du plan de renouvellement. Si dans les peuplements reboisés, le stock sur pied ne retrouve à aucun moment son niveau d'origine, ces renouvellements de peuplements déperissants permettent, à long terme, de limiter les risques de déstockage tout en récoltant du bois de meilleure qualité. En effet, du fait de l'aggravation des effets du climat, qui est également appliquée à la productivité des espèces en reboisement (voir les hypothèses en annexe 3 et paragraphe 2.3), et de la mise en œuvre d'itinéraires sylvicoles relativement dynamiques, l'adaptation de ces peuplements tel qu'appliquée ici implique un stock sur pied plus faible que son niveau d'origine. Cependant le stock sur pied ne représente pas la totalité des volumes produits au cours de la période et il convient d'ajouter les volumes disparus (prélèvement et mortalité) pour comparer le rendement des scénarios avec et sans reboisement.

L'analyse de la production totale cumulée ramenée à l'hectare illustre l'intérêt du plan de renouvellement en regard d'un scénario sans plan (alors que le R0 affiché surestime la production totale cumulée puisqu'il n'intègre pas les déperissements qui interviendraient inéluctablement à moyen et long terme dans les peuplements identifiés). Ainsi, la production totale cumulée augmenterait de plus de 50 % à l'horizon 2080 du fait du plan de renouvellement, avec un gain d'autant plus important que les effets du climat seraient sévères (cf. figure 11). Ainsi l'effet dépréciatif du climat est d'autant plus limité qu'il y a un plan de renouvellement et que l'envergure et la performance de celui-ci sont fortes. Le reboisement limite par conséquent les pertes qui seraient survenues en son absence.

Figure 11 : Production biologique brute cumulée sur les surfaces aidées par le plan de renouvellement selon les scénarios



NB : L'évolution représente le cumul de la moyenne à l'hectare sur l'ensemble de la période de projection pour le graphique de gauche et valeur totale dépendante de la surface reboisée en 2080 pour le graphique de droite. Les surfaces en succès/échec font référence au facteur de réussite ou taux de survie défini pour chaque scénario, les surfaces en échec suivant ensuite la dynamique d'accrus naturels (cf. paragraphe 2.3 et annexe de la tâche 3)

L'analyse de la productivité des forêts et de son adaptation aux changements climatiques nécessite de raisonner à l'échelle du cycle des peuplements pour être appréhendée totalement. Evidemment sur ces horizons de temps, il est difficile d'établir des scénarios d'effets du climat, de production et de récolte forestière robustes et de les comparer entre eux. Néanmoins ces projections mettent en évidence l'effet positif d'un plan de renouvellement sur la nature de la ressource des peuplements ciblés et de sa valorisation dans la filière sur le long terme. Cet effort d'adaptation des peuplements se traduit aussi en matière d'atténuation du changement climatique (cf. paragraphe 5), tant d'un point de vue de la capacité de stockage de carbone à long terme de peuplements actuellement dépérissants que de la production de bois pouvant alimenter des usages à longue durée de vie. Les facteurs de réussite d'un tel plan sont nombreux (cf. rapport objectif forêt²⁷). Ils sont pour certains indirectement pris en compte dans les projections, notamment à travers la différenciation entre les scénarios R1 et R2 en matière de capacité de mise en œuvre des plantations (dépendant entre-autres de la disponibilité en plants ou en ETF) et de taux de succès des plantations (dépendant entre-autres de l'équilibre sylvo-cynégétique, etc.). Cependant, d'autres facteurs ne sont pas testés dans cette étude prospective, notamment les résultats ne présumant pas des modes d'installation des plantations (en plein ou en point d'appui). Dans tous les cas, **l'effet positif du plan de renouvellement est conditionné au bon ciblage des actions de reboisement sur les peuplements dépérissants** actuellement, vulnérables à l'avenir ou économiquement pauvres, **et à une mise en œuvre qualitative des opérations de terrain**, via notamment le choix d'essences adaptées à l'évolution climatique et aux stations, une préparation des terrains et une plantation soignée, la réalisation des entretiens ainsi que des sylvicultures maximisant la production de bois de qualité tout en limitant la prise de risques.

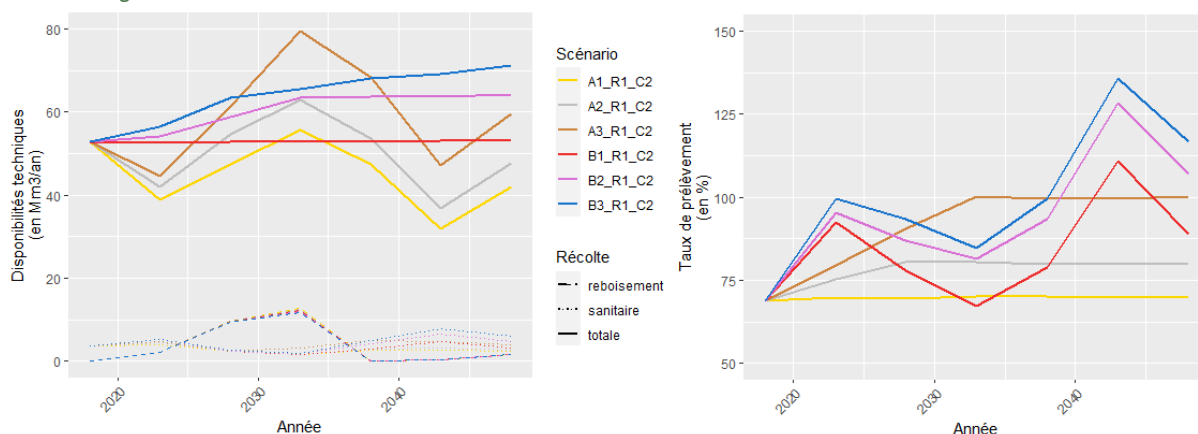
²⁷ MASA, 2023. Le rapport « Objectif Forêt ». <https://agriculture.gouv.fr/rapport-objectif-foret>

4 EVOLUTION DE L'OFFRE ET DE LA DEMANDE EN BOIS

4.1 DES VISIONS CONTRASTEES DE L'EVOLUTION DE LA GESTION ET DE LA RECOLTE DE BOIS

La gamme des six scénarios de gestion projetés représente une diversité de visions sur l'évolution de la sylviculture et des surfaces forestières mises en gestion.

Figure 12 : Evolution du volume de disponibilités techniques et du taux de prélèvement pour la combinaison R1_C2 selon les différents scénarios de gestion.



NB : Les courbes pointillées représentent les volumes de disponibilités issues des coupes liées au plan de renouvellement (avant et après reboisements) et des coupes de produits sanitaires (hors reboisements).

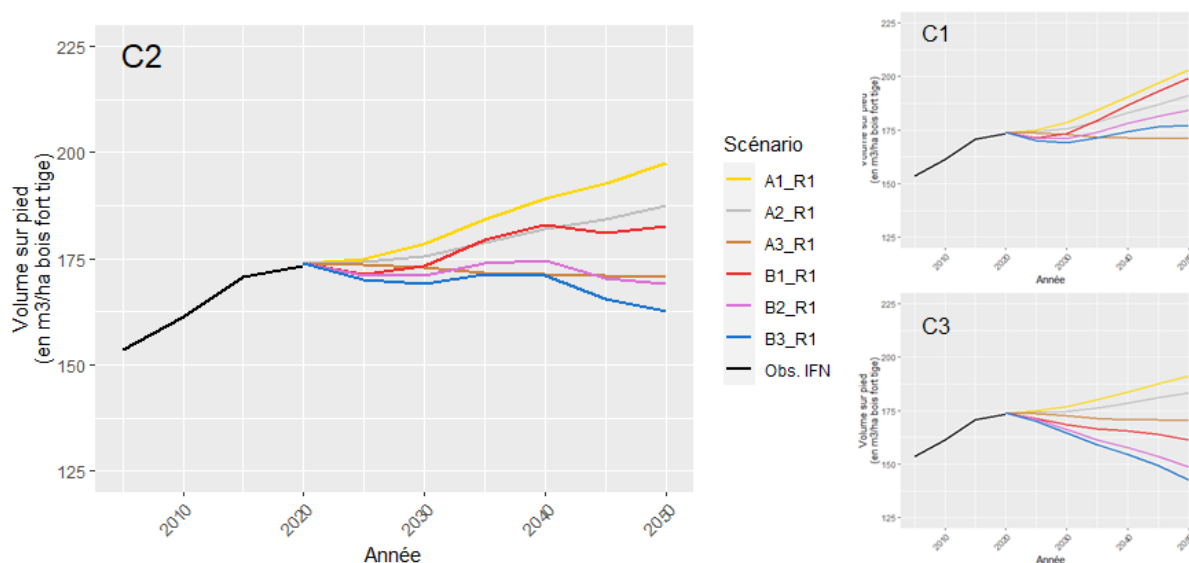
Tableau 5 : Volume de disponibilités techniques et taux de prélèvement moyens par scénario sur la période de projection (2020-2050)

Scénario	Volume de disponibilités techniques			Taux de prélèvement de l'accroissement			
	C1	C2	C3	C1	C2	C3	
Moyenne 2020-2050	A1	51 Mm³/an	44 Mm³/an	35 Mm³/an	70 % (maintien taux actuel)		
	A2	58 Mm³/an	50 Mm³/an	39 Mm³/an	79 % (augmentation progressive à 80 %)		
	A3	70 Mm³/an	60 Mm³/an	48 Mm³/an	95 % (augmentation progressive à 100 %)		
	B1	53 Mm³/an (maintien volume actuel)			74 %	86 %	106 %
	B2	62 Mm³/an (augmentation progressive à 63 Mm³/an)			85 %	99 %	120 %
	B3	66 Mm³/an (augmentation progressive à 75 Mm³/an)			91 %	105 %	127 %

De façon logique dans les résultats, les scénarios guidés par un taux de prélèvement (famille A) fournissent à la filière un volume de disponibilité variable au gré des crises, faisant peser sur le secteur aval les effets du climat. Inversement, les scénarios guidés par un volume de récolte (famille B) induisent des variations au niveau du taux de prélèvement et du bilan des flux dans les forêts. C'est alors principalement l'amont forestier qui encaisse l'effet des crises (cf. figure 12). Dans les deux cas, la mise en œuvre des scénarios testés requiert des formes de gestion des forêts très "adaptatives" : une nécessité de suivre attentivement l'évolution de l'état des peuplements pour adapter les coupes à la productivité dans la famille de scénarios A, peu réaliste dans la pratique sur le terrain ; une organisation et priorisation des coupes entre peuplements sains et dépérissants en fonction des crises sanitaires et de l'état du marché dans la famille de scénarios B, nécessitant une grande agilité de la gestion. **Bien entendu, une trajectoire réaliste pourrait très bien se situer dans un entre-deux par rapport à ces deux visions, le caractère prospectif de ces scénarios permet ici plutôt d'évaluer les conséquences de grands choix de gestion à l'échelle nationale.**

L'évolution de la ressource en forêt est la répercussion directe de l'intensité de gestion des différents scénarios (cf. figure 13), avec une amplitude forte à l'horizon 2050 allant d'un retour au niveau de stock sur pied de 2005 autour de 150 m³/ha à une poursuite de la tendance historique de capitalisation avec des forêts atteignant autour de 200 m³/ha sur pied. Cette amplitude est globalement équivalente à celle des effets du climat (cf. paragraphe 3.1). Si pour les scénarios de la famille A guidés par le taux de prélèvement, la tendance d'évolution du volume reste mécaniquement identique selon les scénarios d'effets du climat, en revanche pour les scénarios de la famille B guidés par un volume de récolte, la tendance peut fortement varier entre le scénario C1 et C3. Par exemple, le volume moyen à l'hectare en France du scénario B1 fluctue autour de 175 m³/ha dans l'option des effets du climat par crises du C2, mais il aurait une tendance à la capitalisation dans le cadre d'un scénario optimiste (C1) et à l'inverse, à la décapitalisation dans le cadre d'un scénario pessimiste (C3).

Figure 13 : Graphique de l'évolution du volume sur pied moyen historique et projeté selon les scénarios de gestion pour le scénario de reboisement R1 et les différents scénarios d'effet du climat.



Pour les scénarios dont la récolte est guidée par le taux de prélèvement (**famille A**), **les disponibilités intermittentes et en baisse dans la plupart des cas, rendent le scénario peu réaliste au regard du fonctionnement de la filière** puisque l'occurrence des coupes en forêt est en réalité multifactorielle, et en partie liée à des facteurs économiques, tels que la demande du marché, surtout en forêt privée. Si le taux de prélèvement moyen en France est un indicateur fondamental de suivi de la gestion durable des forêts²⁸, ce n'est pas sa valeur nationale qui pilote au jour le jour la réalité des pratiques sylvicoles et des surfaces mises en gestion aux échelles locales. Cependant, ces scénarios à visée plutôt théorique sont instructifs sur la nécessité du secteur forêt-bois à développer une grande capacité d'adaptation au risque de fluctuation des dynamiques naturelles, tant au niveau de la réactivité de la gestion forestière (plans de gestion adaptatifs, etc.) que de la flexibilité de la filière aval (stockage et valorisation de bois de crise, etc.). Dans leur philosophie, les scénarios A1 et A2 visent à maintenir un puits de carbone forestier positif, priorisant en premier lieu le stockage de carbone en forêt par rapport à l'alimentation régulière et adéquate en bois de la filière. Le scénario A3 est une analyse plus théorique des disponibilités et de leurs devenir. Il considère que toute la production biologique est récoltée et valorisée par la filière. La contribution nette du secteur forestier au bilan carbone devient alors uniquement attribuable à la valorisation dans la filière. Le résultat de ce scénario est, en moyenne sur l'ensemble de la projection, finalement assez proche du scénario B2.

Parmi ces scénarios, le **A1 entraîne une diminution globale de la disponibilité en bois** afin d'augmenter le niveau de stock en forêt et de **favoriser la fonction de séquestration carbone par l'écosystème**, même si celle-ci reste

²⁸ IGN, 2020. Indicateurs de Gestion Durable. <https://foret.ign.fr/IGD/fr/indicateurs/3.1>

variable et dépendante de la productivité des peuplements (cf. paragraphe 5.2.1). Ce scénario implique une forme “d’extensification” de la gestion dans certaines forêts, afin de privilégier les coupes dans les peuplements plus rentables ou bien dont la situation sanitaire nécessite une valorisation rapide. Ainsi le taux de prélèvement moyen de 70 % englobe des niveaux de gestion et de taux de prélèvement divers en fonction des peuplements et des types de propriété. Avec la hausse du volume de bois sur pied et la baisse de la récolte, ce scénario pourrait également augmenter le capital “risque” de certaines forêts avec un volume exposé aux futures crises plus important et une structuration de la filière peut-être moins propice à valoriser ces futurs produits accidentels et sanitaires. La mortalité restant en forêt au pic de la seconde crise simulée par le scénario C2 (période 2040-2045) est beaucoup plus importante pour le scénario A1 (35 Mm³/an bois fort tige) que B1 (31 Mm³/an) ou encore plus B3 (25 Mm³/an), du fait d’une part du stock sur pied exposé et d’autre part de la valorisation plus forte des bois de crise dans les forêts gérées (chaque facteur pesant pour moitié dans la différence entre B3 et A1).

Le scénario **B1 maintenant le volume de récolte actuel** permet quant à lui un approvisionnement stable de la filière bois dans sa globalité, même si le type et la qualité des approvisionnements pourrait évoluer avec des coupes sanitaires plus importantes (cf. paragraphe 4.3). Ce type de scénario induit un dépassement ponctuel des 100 % de taux de prélèvement lorsque les effets du climat sont plus forts (périodes de crise pour le scénario C2 et dès 2030 pour le scénario C3), et en conséquence une annulation du stockage de carbone en forêt. Au niveau de l’amont forestier, ce scénario n’implique pas nécessairement “d’intensification” de la gestion actuelle, mais plutôt une réorientation de celle-ci. Ainsi les coupes dans les peuplements dépérissants ou ciblés pour le reboisement pourraient augmenter, et les coupes dans certains peuplements sains pourraient être reportées pour compenser la perte de productivité des peuplements et pour éviter une saturation du marché. Ce scénario est sans doute **assez proche de la tendance historique en matière de logique de prélèvement, mais traduit le passage d’une sylviculture “classique” à une sylviculture de “crise” dans certains peuplements**, avec des intensités de coupe potentiellement fortes localement compte-tenu de la baisse de l’accroissement et de la hausse des dépérissements. Dans le cadre d’un scénario d’effet du climat plutôt optimiste (C1), ce scénario de gestion B1 suit une trajectoire “tendancielle” par rapport aux observations passées, hormis lors de la crise actuelle implémentée jusqu’en 2025 (cf. figure 13).

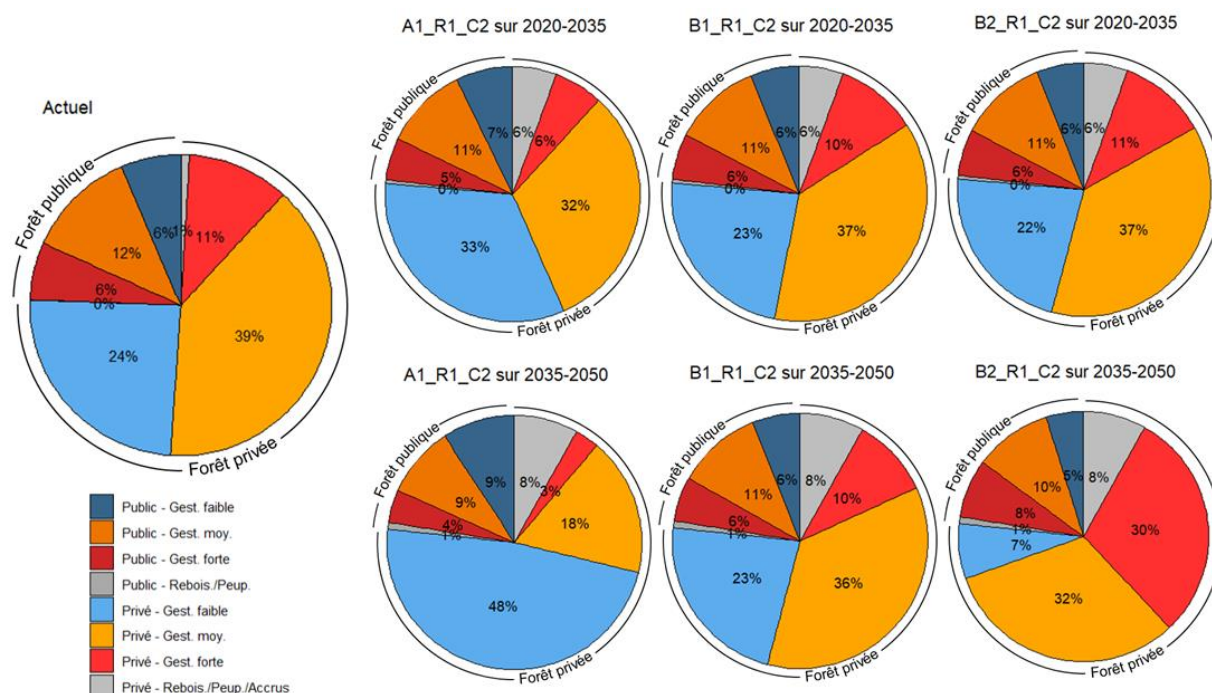
Les scénarios simulant une **augmentation des disponibilités en bois (scénarios B2 et B3)** engendrent dans la plupart des combinaisons de scénarios une baisse plus ou moins importante du volume de bois sur pied (de -5 % en moyenne), avec à moyen terme un taux de prélèvement supérieur à 100 %. Cette **décapitalisation des forêts par la conjonction d’une gestion forestière très active et d’une baisse de la productivité** des forêts pourrait s’apparenter à une “méditerranéisation” des peuplements forestiers, plus ou moins subie ou volontaire. Cette orientation, conséquence d’une diminution des potentialités forestières, de renouvellement avec des essences plus adaptées et moins productives, de coupes fortes liées à des dépérissements massifs, pourrait également résulter d’une anticipation de l’adaptation au changement climatique avec une gestion très pro-active visant l’objectif d’un stock moyen sur pied sensiblement plus faible que l’actuel. Ce scénario pose également la question de l’horizon temporel et du niveau d’une telle décapitalisation. Dans tous les cas, l’atteinte des objectifs de ce scénario requiert une “intensification” forte de la sylviculture et de la mise en gestion des peuplements, notamment dans certaines forêts actuellement peu gérées (cf. chapitre 4.2). La gestion des peuplements dépérissants et le renouvellement via le plan de reboisement, gardent une part prépondérante dans les coupes, mais viennent cette fois-ci s’ajouter aux coupes de sylviculture plus “classique” dans les peuplements sains. Le volume de ces coupes sanitaires est même plus important dans ces scénarios du fait d’une structuration plus importante de la filière et d’une gestion plus active de nombreux peuplements, notamment en forêt privée, dont les arbres morts ou dépérissants sont alors mieux mobilisés (cf. courbes pointillées dans la figure 12). La contribution de la filière bois au bilan carbone est ici privilégiée à celle des écosystèmes forestiers ne pouvant plus stocker de carbone supplémentaire (cf. chapitre 5). Ce type de scénario permettrait de répondre plus facilement à l’évolution de la demande en bois dans un contexte de développement de la bioéconomie (cf. chapitre 4.5), mais dans un contexte de dégradation de l’état des forêts, l’augmentation quasi linéaire jusqu’en 2080 du scénario B3 paraît difficilement tenable à long terme (cf. chapitre 4.2).

Les différents scénarios reflètent tous un enjeu majeur autour de la valorisation des produits sanitaires, concernant aussi bien l’amont (les niveaux de prélèvements varient) que de l’aval du secteur forêt-bois (les produits fluctuent en quantité et qualité). Ces questions sont plus particulièrement développées dans le chapitre 4.3. Ils révèlent également la nécessité d’un monitoring adapté et d’une réflexion autour des indicateurs de suivi de la gestion durable et de leurs valeurs. En effet, les fortes variations du taux de prélèvement représenté ici soulèvent la question d’une analyse d’un tel taux sur des fenêtres temporelles plus larges et en ayant conscience de l’impact des crises sur sa valeur. Au-delà de ces conclusions communes, les différents scénarios présentent surtout des visions très contrastées d’évolutions de la gestion, avec des conditions de mise en place et des conséquences variées (cf. chapitre 4.2). Ces conséquences concernent les questions de bilan carbone et d’approvisionnement en bois, particulièrement développées ici, mais bien d’autres enjeux (risques, biodiversité, emploi, etc.) sont à prendre en compte dans l’analyse et la prise de décision autour de telles trajectoires.

4.2 LES CONDITIONS D’UNE AUGMENTATION DE LA RECOLTE DE BOIS EN FORET

L’évolution des prélèvements est modélisée dans l’étude par l’intermédiaire de deux “curseurs” pour chaque strate forestière : la variation de la surface en gestion active pour la production de bois, et la modification de la sylviculture via l’intensité des coupes et le diamètre d’exploitabilité (cf. annexe de la tâche 8). La surface mise en gestion est le facteur prépondérant pour moduler les disponibilités en bois car elle fait varier instantanément plusieurs hectares entre des systèmes plus ou moins gérés, la modification de la sylviculture telle qu’implémentée ici n’influe finalement que peu sur les résultats car les surfaces concernées sont déjà en gestion.

Figure 14 : Répartition de la surface forestière par niveau de gestion et type de propriété actuellement et en 2050 suivant quelques scénarios de gestion



L’atteinte des objectifs des scénarios d’augmentation de la récolte (B2 et B3) requiert une forte augmentation de la proportion de surfaces gérées pour la production de bois, alors qu’inversement, les scénarios de diminution de la récolte (A1) entraînent une diminution de cette part de surface (cf. passage de surfaces entre les différents niveaux de gestion “faible”, “moyen” ou “fort” suivant les scénarios dans la figure 14 ci-dessus). L’écart de gestion entre les scénarios s’exprime d’autant plus que l’horizon temporel est lointain et que les orientations divergent, surtout l’évolution de la gestion des premières décennies de la projection est très liée à la crise en cours et à la

mise en place du plan de renouvellement. Finalement, le scénario de maintien de la récolte actuelle en volume (B1) est celui qui modifie le moins la répartition actuelle des surfaces selon les niveaux de gestion. Le maintien des volumes de récoltes dans un contexte de baisse de la productivité pour ce scénario passe essentiellement par les coupes liées au plan de reboisement et les coupes de peuplements dépérissants. Le niveau de prélèvement et de gestion dans les autres peuplements n'évolue presque pas au long de la période de projection (cf. figure 14 pour le B1).

Les variations des surfaces entre niveaux de gestion sont hétérogènes suivant les régions et les types de forêts. Elles dépendent des potentiels d'évolution de la gestion définis par strate (cf. annexe de la tâche 8), avec des scénarios qui traduisent des **possibilités d'augmentation de la gestion plus importantes en forêt privée qu'en forêt publique, plutôt pour des peuplements feuillus que résineux, et avant tout dans les zones de montagne ou en méditerranée**. Ce sont en effet ces forêts qui sont actuellement les moins gérées pour la production de bois, avec les taux de prélèvement les plus faibles, et dans lesquelles une augmentation des surfaces passant en coupe paraît envisageable, notamment si une amélioration de l'accessibilité des peuplements y était menée. L'analyse des conditions d'accès aux ressources forestières montre qu'environ 800 000 ha de forêts pourraient faire l'objet d'une gestion plus active si un développement de la desserte forestière y était réalisé, auxquels pourraient s'ajouter aussi environ 800 000 ha de peuplements pour lesquels un développement des systèmes de récolte en forte pente permettrait des récoltes supplémentaires (cf. annexe de la tâche 5). Ce levier majeur de l'augmentation de la récolte notamment en zone de montagne est ici pris en compte dans les surfaces passant vers une gestion plus forte, mais n'est clairement pas suffisant pour atteindre l'objectif de récolte du scénario B3, et même du scénario B2 qui nécessite de passer près de 20 % de la surface forestière d'une gestion "faible" à une gestion plus forte (cf. figure 14). Par ailleurs, l'amélioration des conditions d'accessibilité se heurte à différents obstacles et nécessite des investissements importants dans des zones de montagne pour lesquelles un enjeu d'extension des aires protégées existe également (cf. SNAP²⁹, SNB 2030³⁰).

D'autres leviers seraient donc nécessaires pour une augmentation de la récolte telle qu'envisagée dans les scénarios B2 et B3. Ces leviers concernent essentiellement la forêt privée (cf. planification écologique et propositions de mesures pour la gestion des forêts privées³¹). En effet, en forêt publique, la possibilité d'augmentation des prélèvements est limitée compte-tenu du taux de prélèvement déjà fort dans les peuplements mis en sylviculture (le taux de prélèvement y est quasiment identique entre les catégories de gestion "moyenne" et "forte") et des surfaces devant être laissées en libre-évolution pour des enjeux environnementaux (les surfaces en catégories de gestion "faible" sont à 75 % hors sylviculture ou dans des aires de protection forte). La répartition des surfaces en forêt publique pourrait d'ailleurs évoluer vers une plus grande part de forêts en gestion "faible", du fait de peuplements arrivant en limite de production sur certaines stations ou pour lesquels les enjeux de protection de la biodiversité deviennent primordiaux. En forêt publique, ce sont essentiellement les coupes sanitaires ou de reboisements qui permettent un maintien ou une légère augmentation des disponibilités, la marge de manœuvre dans la gestion "normale" est faible et serait alors plutôt liée à des peuplements arrivant à maturité et à une éventuelle baisse des diamètres d'exploitabilité (cf. figure 15).

²⁹ Gouvernement, 2021. Stratégie Nationale pour les Aires Protégées 2030.

https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/DP_Biotope_Ministere_strat-aires-protegees_210111_5_GSA.pdf

³⁰ Gouvernement, 2023. Stratégie Nationale Biodiversité 2030. https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/Dossier-de-presse_SNB2030.pdf

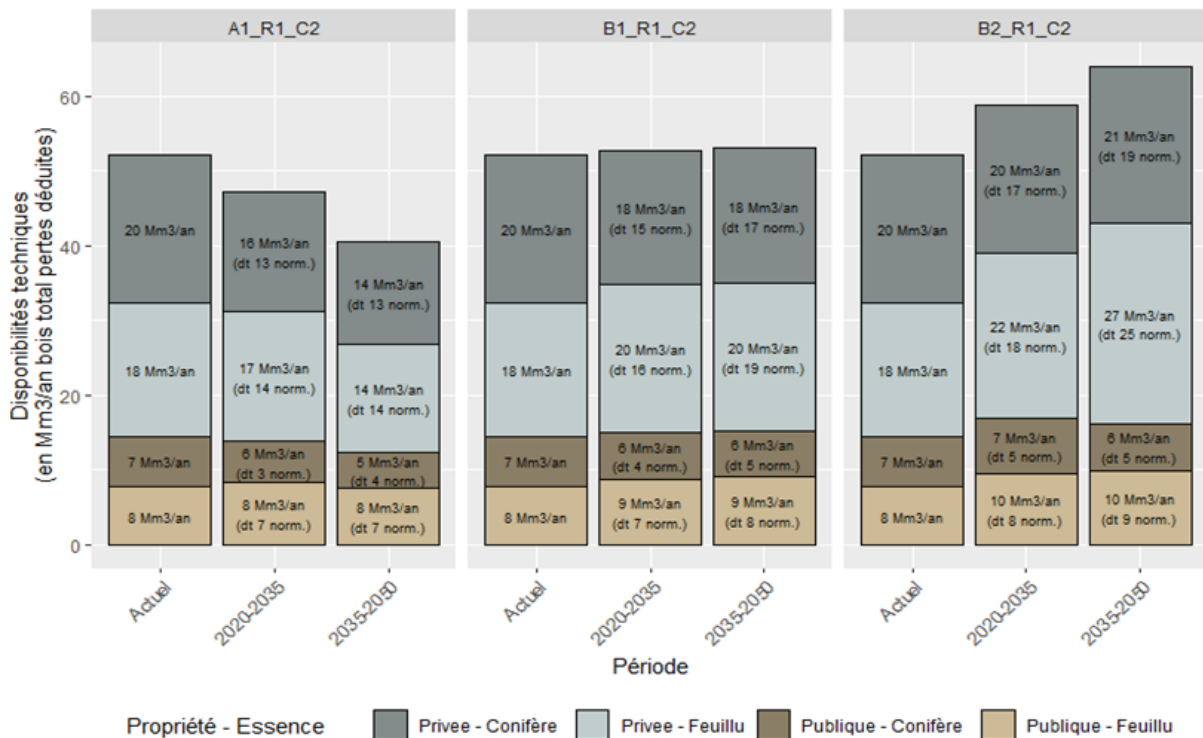
³¹ Secrétariat général à la planification écologique, 2023. La planification écologique pour la forêt.

<https://www.gouvernement.fr/upload/media/content/0001/06/94b5555866d658dedc6ae77125b6c8eaf7e1b835.pdf>

CGAAER, IGEDD, IGF, 2023. Mise en gestion durable de la forêt française privée. <https://agriculture.gouv.fr/mise-en-gestion-durable-de-la-foret-francaise-privee-0>

MASA, 2023. Mobiliser les propriétaires forestiers. <https://agriculture.gouv.fr/remise-des-propositions-d-actions-mobiliser-les-proprietaires-forestiers>

Figure 15 : Répartition des disponibilités techniques par type de propriété et d'essence pour la période actuelle et les périodes projetées selon quelques scénarios de gestion



NB : Les volumes de disponibilités fournis sur le graphique, représentent des volumes pertes déduites, avec une distinction entre parenthèse des coupes "normales" (hors coupes liées au plan de renouvellement et hors coupes sanitaires. La période actuelle fait référence aux observations IFN de la période 2013-2022 et les périodes projetées lisent les résultats sur 15 ans pour englober l'effet des crises.

L'essentiel du potentiel d'augmentation de la récolte dans le cadre de scénarios plus dynamiques tels que simulés dans l'étude repose donc sur la forêt privée (cf. figure 15). Pour atteindre les objectifs du scénario B2, cela nécessiterait à la fois une mise en gestion d'une part très importante de la surface actuellement pas ou peu gérée (passage de 24 % à 7 % de la catégorie de gestion "faible" en forêt privée entre aujourd'hui et la période 2035-2050, soit plus de 3 millions d'hectares, cf. figure 14) et une intensification de la gestion dans des forêts déjà un peu gérées (passage de 11 % à 30 % de la catégorie gestion "forte" en forêt privée entre aujourd'hui et la période 2035-2050, soit près de 4 millions d'hectares, cf. figure 14). Cette dynamique concerne essentiellement des forêts pour le moment globalement moins gérées, soit les peuplements feuillus des régions du Sud-Est de la France et, dans une moindre mesure, de la façade atlantique. Ces peuplements n'étant pas parmi les plus productifs, l'effort de massification de la gestion dans ces zones est important en regard du gain en disponibilités, en revanche l'enjeu prégnant de la protection contre les incendies, notamment en zone méditerranéenne, pourrait motiver un certain nombre d'interventions. En plus de la mise en place d'un plan de reboisement massif, **une telle intensification des prélèvements présuppose des évolutions majeures dans la gestion des forêts privées**, avec la levée de nombreux freins à la mobilisation des bois, tant économiques ou techniques que sociaux. Si l'accessibilité physique des peuplements peut représenter une des contraintes à l'exploitation des bois (cf. paragraphes précédents), de nombreux autres facteurs tels que le morcellement des propriétés forestières, la liberté de choix et de priorités des propriétaires, le prix des bois, l'acceptabilité sociale des coupes, etc., jouent un rôle prépondérant dans la mise en gestion des forêts privées. Les leviers pour dynamiser la gestion dans ces forêts peuvent passer par des outils juridiques, tels que l'abaissement récent du seuil des plans simples de gestion obligatoires (PSG) à 20 ha³² qui pourrait concerner environ 500 000 ha, ou diverses incitations pour des modes de gestion groupés ou pour le renouvellement des peuplements. Mais les critères économiques liés à

³² Loi n° 2023-580 du 10 juillet 2023 visant à renforcer la prévention et la lutte contre l'intensification et l'extension du risque incendie

l'évolution de la demande et au prix des bois, les critères techniques liés à l'organisation et la structuration des gestionnaires et exploitants, la prise en compte des potentialités des sols, ou encore les critères sociaux liés notamment à la perception des coupes de bois en forêts ou à la prise de risques par rapport au changement climatique, seront primordiaux pour permettre de tels changements. Par ailleurs, le niveau de réponse des propriétaires privés à des incitations pour une évolution de la gestion de leurs forêts demeure relativement mal connu, ajoutant une difficulté à la mise en œuvre réelle d'une telle intensification.

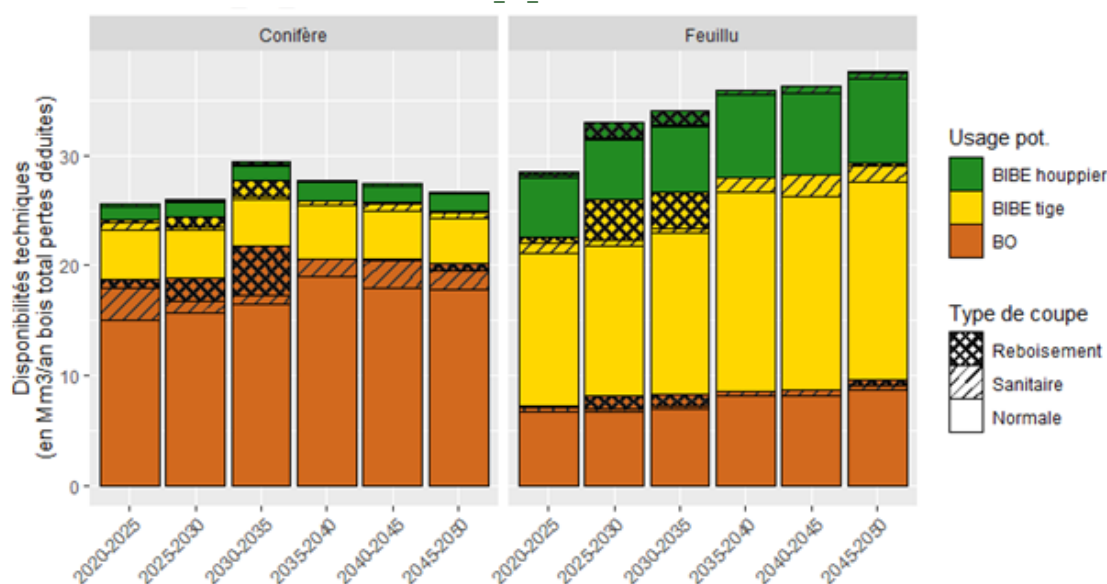
Des efforts majeurs semblent donc nécessaires pour atteindre les objectifs de récolte des scénarios B2 et B3. Il convient d'ailleurs de remarquer que compte-tenu de la baisse de la productivité des peuplements en raison d'une aggravation des effets du climat et des bornes de gestion maximale fixées dans l'étude en matière d'intensification (pas d'augmentation de la gestion dans les zones en aires de protection forte, et variation maximale de -10 cm du diamètre d'exploitabilité et de +10 % de l'intensité des coupes par rapport aux sylvicultures actuellement observées dans les zones fortement gérées, taux de valorisation des arbres morts ou déperissants constants par niveau de gestion), les objectifs du scénario B2_C3 deviennent inatteignables en projection à partir de 2060 et ceux du scénario B3 sont impossibles à atteindre dès 2050 pour le scénario C3 et après 2070 pour le scénario C1.

Dans tous les cas, l'augmentation de la récolte en bois des scénarios plus dynamiques nécessite la valorisation de produits et d'essences risquant d'évoluer, notamment vers plus de bois feuillus, souvent avec moins de qualité bois d'œuvre, et vers plus de bois déperissants (cf. figure 15 et paragraphe suivant 4.3). La récolte additionnelle "subie" par rapport à la récolte actuelle est donc essentiellement constituée de bois d'industrie ou d'énergie (BIBE) feuillus, avec des conséquences sur les possibilités d'usages dans la filière (cf. paragraphe 5.3). En effet, si dans un scénario de maintien de la récolte actuelle, le BIBE feuillus représente environ 40 % des volumes (scénario B1_C2), dans les scénarios d'augmentation de la récolte cette part s'accroît sensiblement (environ 44 % en 2050 pour le scénario B2_C2, 46 % pour le B3_C2 et 42 % pour le A3_C2). **L'adaptation de l'approvisionnement de l'aval aux évolutions des types de bois disponibles, permettant une rentabilité des coupes dans ces peuplements, représente donc un des leviers majeurs pour une augmentation des récoltes en forêt.** Les volumes de disponibilités techniques présentés ici reposent également sur l'exploitation d'une partie des branches des houppiers, ce qui est dans la réalité très variable selon les modes d'exploitation et selon la sensibilité des sols à l'export de rémanents (cf. paragraphe suivant et analyse de sensibilité dédiée sur ce point).

4.3 L'ENJEU FORT DE LA VALORISATION DES PRODUITS ACCIDENTELS

Ces dernières années ont été marquées par une très forte augmentation des produits accidentels et sanitaires dans la récolte de bois. Bien que difficile à estimer et très variable selon les essences et les sources de données, la part d'arbres déperissants ou morts dans les coupes serait de l'ordre de 7 % du volume récolté en moyenne, avec un taux beaucoup plus élevé en forêt publique (et oscillant entre 0 % et 60 % suivant les essences, les périodes et le type de propriété, cf. annexe de la tâche 8). Ce type de récolte a été pris en compte dans les projections et distingué dans les résultats selon les observations actuelles de mobilisation et de valorisation des bois de crise. Compte-tenu de l'aggravation de la mortalité, les volumes concernés pourraient augmenter à l'avenir notamment dans les scénarios d'effets du climat les plus pessimistes et au cours des périodes de crise, mais aussi dans les scénarios de gestion les plus dynamiques qui permettraient a priori une meilleure mobilisation de ces arbres. Selon les périodes et les scénarios simulés, ce taux de produits sanitaires pourrait varier entre 3 à 11 % de la récolte et entre 7 et 30 % de la mortalité, avec les taux les plus forts atteints pour le scénario B3 combiné au scénario C3 (cf. tableau 6). Les périodes de crise pourraient aussi engendrer des arrivées massives de produits sanitaires dans les disponibilités (cf. figure 16), ainsi qu'une fluctuation de la récolte en fonction des pics et des creux des vagues de crises. La mise en œuvre du plan de renouvellement via le reboisement de peuplements déperissants ou vulnérables entraîne également un afflux de produits bois liés à des coupes plus ou moins "subies" lors des premières périodes de projection.

Figure 16 : Répartition des disponibilités techniques par compartiment de l'arbre, usage potentiel, essence et type de coupe pour le scénario B2_R1_C2 entre 2020 et 2050



NB : l'ordre des coupes dans la méthode de calcul des disponibilités étant hiérarchisé (coupes liées au plan de renouvellement, puis coupes sanitaires dans les autres peuplements, puis coupes "normales"), les volumes classés entre les catégories "reboisement" et "sanitaire" sont exclusives et il peut être considéré qu'une grande partie des coupes de "reboisement" avant 2035 sont également des produits sanitaires.

Tableau 6 : Part de produits sanitaires dans la mortalité et dans la récolte pour quelques périodes et scénarios contrastés

Exemples de périodes et de scénarios		Produits sanitaires dans la mortalité totale	Produits sanitaires dans la récolte totale
Période 2030-2035 (accalmie scénario C2)	A1_R1_C2	2 Mm³/an sur 14 Mm³/an = 13 %	2 Mm³/an sur 54 Mm³/an = 3 %
	B2_R1_C2	2 Mm³/an sur 13 Mm³/an = 14 %	2 Mm³/an sur 61 Mm³/an = 3 %
Période 2040-2045 (2 nd e crise scénario C2)	A1_R1_C2	3 Mm³/an sur 38 Mm³/an = 7 %	3 Mm³/an sur 31 Mm³/an = 8 %
	B2_R1_C2	6 Mm³/an sur 34 Mm³/an = 19 %	6 Mm³/an sur 61 Mm³/an = 10 %
Période 2045-2050 scénario B3_R1_C3		7 Mm³/an sur 25 Mm³/an = 30 %	7 Mm³/an sur 67 Mm³/an = 11 %

NB : Les volumes sont exprimés en bois fort tige et la mortalité représente l'ensemble du flux (restant et sorti de forêt). Les produits sanitaires concernent les bois de crise hors coupes liées au plan de renouvellement (sur la période 2030-2035 de fin de mise en œuvre du plan dans le scénario R1, ces coupes en vue du reboisement représentent environ 12 Mm³/an)

Ce phénomène induit par les effets du changement climatique implique un certain changement de paradigme, tant au niveau de l'amont que de l'aval du secteur forêt-bois. Du côté de la **gestion forestière, l'importance d'une réactivité forte pour limiter les pertes nécessite de mettre en place des plans de gestion "adaptatifs"** permettant des prélèvements anticipés et rapides dans les peuplements vulnérables et impactés par les crises pour valoriser au mieux les bois de crises, tout en adaptant la fréquence des coupes dans les autres peuplements pour éviter une saturation du marché en période de crise et pour s'adapter à la baisse de productivité. L'enjeu est également de prévenir des pertes économiques importantes, en récoltant les bois déperissants tant qu'ils sont encore facilement valorisables, ce qui dépend des essences, de leur vitesse de déperissement mais aussi de la dégradation de leur bois. Ce type de gestion requiert par ailleurs une **surveillance fine et régulière des forêts et des outils de monitoring adaptés**.

Ces crises impliquent également **une forte souplesse et réactivité dans l'organisation de la mobilisation des bois**. Des mécanismes sont en effet à mettre en place pour absorber des arrivées massives de bois des essences ou des zones géographiques particulièrement touchées. Il s'agit notamment d'acquiescer une forme de modularité

territoriale dans la disponibilité en ETF, dans les capacités de stockage et dans les approvisionnements des entreprises, etc. Ces conséquences touchent également la chaîne de transformation des bois, pour laquelle les fluctuations des types et des qualités des bois sur le marché forment un **défi d'adaptation des techniques et technologies utilisées pour valoriser au mieux tout type de bois**. Des bois de moins bonne qualité ou de plus petits diamètres pourraient ainsi être concernés.

Compte-tenu de l'enjeu, il semble envisageable que la capacité de mobilisation et de valorisation des bois déperissants ou morts soit améliorée dans les années à venir, même si cela est extrêmement dépendant des types de crises et des essences touchées (par exemple un épicéa scolyté est plus facilement valorisable qu'un sapin scolyté, etc.). Par ailleurs, les taux de valorisation de la mortalité appliqués ici, **intègrent de nombreuses incertitudes, notamment liées aux données sur lesquelles ils se basent** (cf. annexe de la tâche 8). Faute d'informations plus précises disponibles, des **hypothèses simplificatrices ont également été formulées, telles que la préservation de la qualité des bois déperissants ou morts, la même proportion de branches que les arbres vifs**, la valorisation indistincte des arbres de tout diamètre à partir de 22,5 cm, et la prise en compte de seulement quatre facteurs de variation des taux de valorisation (gestion, propriété, deux groupes d'essences). Pour analyser la sensibilité des résultats à ces incertitudes et estimer l'impact que pourrait engendrer une potentielle amélioration des capacités de valorisation de ces produits sanitaires, une augmentation de 50 % (x1,5, cf. tableau 7) des taux de valorisation a été testée sur les résultats de récolte du scénario B2_R1_C2.

Tableau 7 : Valeurs initiales de l'étude et modifiées pour l'analyse de sensibilité des taux de valorisation de la mortalité

Propriété	Essence	Taux de valorisation de la mortalité (3 valeurs selon niveau de gestion faible/moyen/fort)	
		Paramètres retenus dans l'étude	Analyse sensibilité
Privée	Feuillus	1 % - 5 % - 50 %	2 % - 8 % - 75 %
	Résineux	5 % - 30 % - 70 %	8 % - 45 % - 100 %
Publique	Feuillus	10 % - 40 % - 70 %	15 % - 60 % - 100 %
	Résineux	15 % - 60 % - 90 %	23 % - 90 % - 100 %

Les pertes d'exploitation de ces bois de crise risquant d'être supérieures à celles des bois sains, compte-tenu de la présence de branches mortes et de bois cassants, une analyse de sensibilité a aussi été menée sur les taux de pertes de ces arbres. Plus généralement, les incertitudes sont majeures sur la part de branches et de menus bois du houppier faisant réellement l'objet d'une valorisation économique, d'autant que les recommandations autour de la récolte de rémanents poussent à favoriser un plus grand retour au sol à l'avenir. Les taux retenus dans l'étude ont fait l'objet de discussions dédiées en groupe de travail (cf. annexe de la tâche 6), mais compte-tenu de ces incertitudes, l'analyse de sensibilité sur les pertes d'exploitation intègre également une hausse des pertes pour les arbres sains. Sont considérées dans cette analyse une non-exploitation du houppier des bois de crise, une augmentation de 50 % des pertes dans la tige des bois de crises et de 50 % dans les houppiers des arbres vifs (cf. tableau 8).

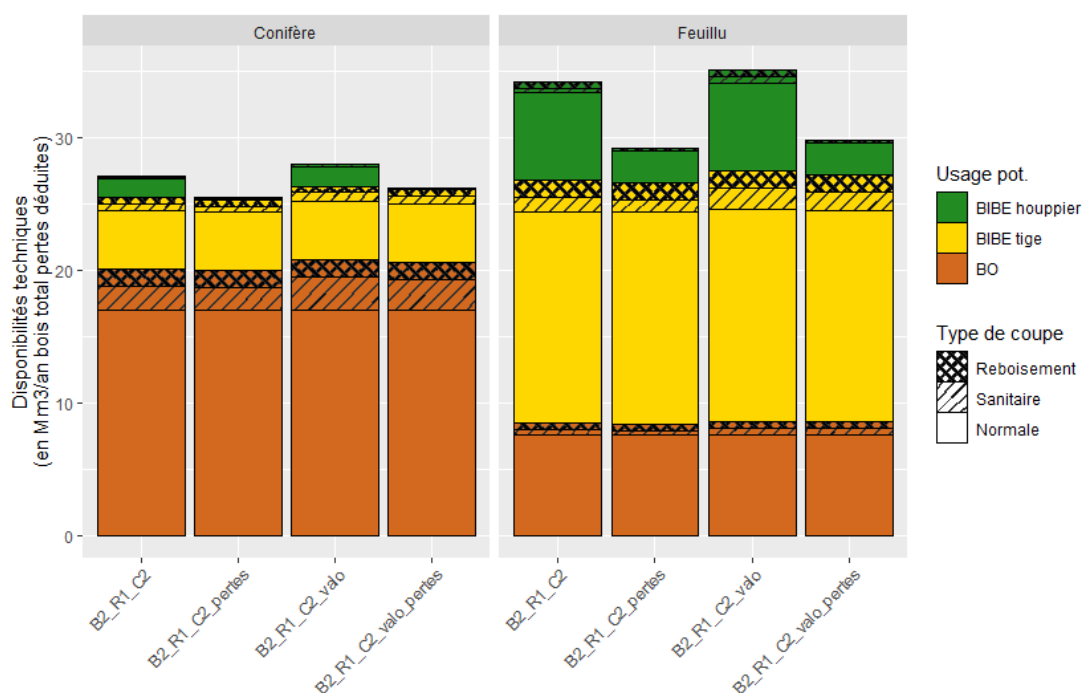
Tableau 8 : Valeurs initiales de l'étude et modifiées pour l'analyse de sensibilité des taux de pertes d'exploitation

Essences	Compartiment	Taux de pertes d'exploitation		
		Paramètres retenus dans l'étude	Analyse sensibilité prod. normaux	Analyse sensibilité prod. sanitaires
Toutes	Tige (BO)	8 %	8 %	15 %
Toutes	Tige (BIBE)	15 %	15 %	25 %
Résineux	Grosses branches	60-75 % (selon essence)	90-100 % (selon essence)	100 %
Résineux	Menus bois	80-95 % (selon essence)	100 %	100 %
Feuillus	Grosses branches	50-60 % (selon diamètre)	75-90 % (selon diamètre)	100 %
Feuillus	Menus bois	70-80 % (selon diamètre)	100 %	100 %

Une hausse de 50 % du taux de valorisation des arbres morts n'aurait qu'un impact relativement modéré sur la récolte totale (environ 2 Mm³/an de bois en plus, cf. figure 17), sachant que le plus gros potentiel se trouve dans les forêts feuillues privées, pour lesquelles les taux de valorisation même réévalués restent assez faibles. Cependant, cette hausse du taux de valorisation pourrait être envisagée de façon dynamique dans le temps et engendrer ainsi un potentiel non négligeable de récolte supplémentaire par rapport à l'actuel. En revanche, la hausse du taux de pertes d'exploitation a un impact majeur sur les résultats (près de 7 Mm³/an de bois en moins), mais aurait moins d'influence sur la tendance d'évolution des disponibilités puisque la récolte actuelle serait aussi concernée. Les houppiers des essences feuillues sont le compartiment le plus sensible à cette modification. Ce constat renforce la vigilance par rapport aux incertitudes existants sur le calcul des volumes exploités et le besoin de consolider par des travaux scientifiques et des suivis de chantiers ce sujet des pertes d'exploitation (cf. annexe de la tâche 6).

L'impact de ces variations de taux sur le bilan carbone, non calculé ici pour ces analyses de sensibilité, serait à mettre en regard de la durée de vie de ces bois dans la filière par rapport à celle qu'aurait ces branches laissées en forêt, mais aussi de leur impact sur le carbone du sol et la fertilité.

Figure 17 : Répartition des disponibilités techniques moyennes entre 2020 et 2050 selon l'analyse de sensibilité sur le taux de pertes d'exploitation et sur le taux de valorisation de la mortalité



NB : Les résultats sont présentés par compartiment de l'arbre, usage potentiel, essence et type de coupe pour le scénario B2_R1_C2. L'analyse de sensibilité est réalisée a posteriori sur les résultats du scénario, l'objectif initial de récolte n'est donc plus forcément respecté.

4.4 UNE EVOLUTION DE LA DEMANDE DEPENDANTE DES MARCHES DE DESTINATION FINALE DES PRODUITS BOIS

Dans cette partie, l'analyse de l'évolution de la demande totale de bois s'est basée sur un scénario de référence différent selon le secteur de consommation finale du produit bois en question (hypothèses présentées en annexe de la tâche 4). La quantité de produits bois demandée par les consommateurs français de chaque marché de destination finale a été estimée, afin d'en déduire le volume de bois nécessaire à l'approvisionnement de ces marchés. Les résultats sont présentés sous la forme d'une variation jusqu'en 2050, par rapport à l'année de référence 2019, et peuvent être résumés ainsi :

- Pour le secteur du bâtiment, notre scénario prospectif montre une baisse des surfaces de construction neuve d'ici 2050 au profit de la rénovation qui présente une tendance croissante dans les prochaines années. Ces tendances s'expliquent par les incitations réglementaires³³ qui visent davantage à rénover qu'à construire. En tenant compte de ces tendances, nos projections montrent **une augmentation du volume de bois destiné au secteur du bâtiment de l'ordre de 33 % en 2050 par rapport à 2019**. Cet accroissement est fortement lié à l'activité de rénovation qui a déjà commencé sa tendance haussière en 2021³⁴, sous l'effet des incitations réglementaires (notamment du dispositif MaPrimRénov') en faveur des travaux de rénovation énergétique et d'amélioration du parc existant.
- En ce qui concerne le secteur de l'ameublement, **une augmentation de 29 % du volume de bois d'ici 2050 par rapport à 2019 est projetée** par notre scénario. Cette tendance pourrait se matérialiser grâce à la croissance future du revenu national brut par habitant, supposée sur la base d'une dynamique économique française soutenue³⁵. Cette croissance devrait renforcer la capacité de financement des ménages et des entrepreneurs, favorisant notamment l'achat de meubles de cuisine et de bureau.
- Pour le secteur de l'emballage bois, **une hausse de 18 % de la demande en bois serait attendue d'ici 2050**. Cette tendance haussière repose sur l'hypothèse de maintien de la dynamique économique de l'industrie française et du secteur tertiaire.
- Concernant le secteur du bois énergie, **une augmentation de 13 % en moyenne est estimée à l'horizon 2050 par rapport à 2019**. Cette hausse repose sur l'hypothèse d'une volonté croissante d'améliorer l'accès aux énergies renouvelables, dont la biomasse solide. Il est à noter que les biocarburants à partir de biomasse ne sont pas inclus dans notre analyse.
- Contrairement aux autres secteurs, **une diminution de 5 % est projetée pour le secteur de pâte à papier jusqu'en 2050**. En effet, la dynamique de ce marché est étroitement liée aux fluctuations du marché mondial de la pâte à papier. Selon notre scénario prospectif, la demande potentielle future est estimée à la baisse, en grande partie en raison des préoccupations environnementales.

Au total, la demande de bois de ces différents secteurs enregistre une hausse de 16 % hors bois énergie et de 14 % avec bois énergie.

En guise d'analyse de sensibilité, une comparaison entre les résultats des projections présentés ci-dessus et ceux des scénarii Pro Techno et Sobriété de l'étude FBF-Copacel-Codifab-Carbone 4³⁶ a été réalisée. Il ressort que les tendances d'évolution sont proches, notamment avec le scénario Pro Techno. En effet, le scénario Pro Techno projette une augmentation de 29 % pour le secteur de la construction et de 6 % pour le secteur de l'ameublement en 2050. Pour les secteurs d'emballages et de bois énergie, le scénario Pro techno prévoit une baisse de 9 % et de 16 % respectivement, la dernière étant liée principalement à la diminution prévue de l'usage industriel du bois énergie.

Pour le scénario Sobriété, le secteur de la construction enregistre la hausse la plus élevée en termes de volume de bois demandé par rapport aux deux autres scénarii avec +49 %. D'un autre côté, le secteur de l'ameublement enregistre la baisse la plus importante de la demande de bois (-38 % entre 2019 et 2050). Cette tendance est liée à la forte baisse de la densité surfacique de meubles lors de la première installation et des achats complémentaires. Le même constat de baisse pour le secteur de l'emballage, où le scénario Sobriété présente la diminution la plus importante due à l'hypothèse de retour vers une économie plus locale pour les secteurs

³³ Loi Énergie-Climat, adoptée en 2019, et loi Climat et Résilience, promulguée en 2021

³⁴ MTECT, 2024. Tableau de suivi de la rénovation énergétique dans le secteur résidentiel.

<https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/tableau-de-suivi-de-la-renovation-energetique-dans-le-secteur-residentiel>

³⁵ Banque de France, 2021. Projections macroéconomiques – Septembre 2021. <https://publications.banque-france.fr/projections-macroeconomiques-septembre-2021>

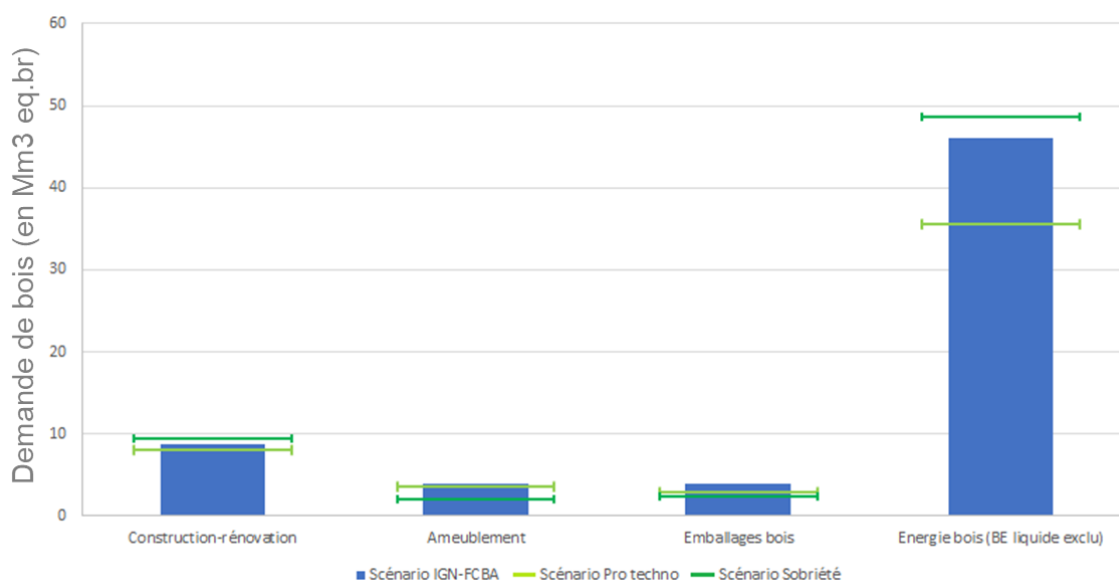
³⁶ FBF, Copacel, Codifab & Carbone 4, 2024. Filière forêt-bois : Scénario de convergence du bouclage bois-biomasse à l'horizon 2050. <https://franceboisforet.fr/2024/02/12/communiquede-presse-2030-2050-quel-scenario-carbone-pour-la-filiere-foret-bois/>

agroalimentaire, des transports et d'industrie lourde. Pour le secteur de l'énergie, ce scénario prévoit une hausse de la demande de 14%.

Pour le secteur de pâte à papier, la comparaison entre le scénario de demande de cette étude et ceux de l'étude Carbone 4 n'est pas appropriée en raison des différences de périmètre. En effet, l'analyse s'est concentrée sur l'utilisation du bois vierge issu de la forêt française par les producteurs locaux, alors que l'étude Carbone 4 a fait des projections incluant la demande de papier cartons recyclés.

L'étude FBF-Copacel-Codifab-Carbone 4 a établi un scénario « de convergence » plutôt proche du scénario Sobriété, avec une meilleure mobilisation des produits bois en fin de vie, un équilibrage imports-exports et en posant des hypothèses spécifiques sur l'énergie (+7 Mm³ pour les industriels de la filière en autoconsommation et +7 Mm³ pour les autres usages - BE liquide étant exclu). Les projections de demande de cette étude sont donc proches de celles du scénario de convergence de l'étude Carbone 4 pour ce qui concerne les secteurs de la construction, du meuble et de l'emballage. Pour le bois énergie, le scénario est plus ambitieux (de l'ordre de 18%), compte tenu des choix précités.

Figure 18 : Comparaison de la demande de bois par secteur et par scénario en 2050 (en Mm³ équivalent bois rond)



NB : Le secteur pâte à papier n'est pas inclus dans ce graphe car le périmètre d'analyse de l'étude Carbone 4 sur les scénarios Pro techno et sobriété n'est pas le même que celui de cette étude : ces scénarios analysent la demande totale en papier-carton du marché français alors que cette étude se focalise sur la demande de bois pour la production française de pâte à papier.

4.5 UNE ADEQUATION DE LA RECOLTE A LA DEMANDE VARIABLE SELON LES SCENARIOS

Une confrontation entre l'offre et la demande a été réalisée en évaluant les volumes de BO, de BI, de connexes et de déchets nécessaires à la satisfaction de la demande identifiée dans la section 4.4, et en les comparant aux résultats de disponibilités de l'amont forestier selon différents scénarios de gestion décrits au paragraphe 4.1.

Pour rappel, **les scénarios d'augmentation progressive de la récolte (B2 et B3) se traduisent par une hausse de la récolte de BO de 18 % (résineux et feuillu) et une hausse de la récolte de BIBE de 23 %.**

Plus en détail, on peut noter les éléments suivants pour le climat C2 (cf. figure 20) :

- Pour le scénario B1, la récolte globale reste constante. La répartition entre BO potentiel, BIBE, résineux et feuillus est relativement stable ;
- Pour le scénario B2, on observe une augmentation de la récolte jusqu'à 2035 puis une stabilisation. En 2035, le BIBE feuillu constitue entre 65 % de l'augmentation de la récolte, le BO résineux 20 % et le BO

feuillu 15 %. A partir de 2040, la récolte de BO résineux baisse jusqu'à revenir progressivement à la récolte de 2020 en 2060 ;

- Pour le scénario B3, on observe une augmentation de la récolte jusqu'à 2035 puis une augmentation plus faible jusqu'en 2065 puis une baisse jusqu'en 2080. En 2035, le BI feuillu constitue entre 50 % et 75 % de l'augmentation de la récolte, le BO résineux entre 10 % et 20 %. A partir de 2035, la récolte de BO résineux baisse jusqu'à être revenir progressivement à la récolte de 2020 en 2060.

Le climat influence la récolte totale puisqu'en C3, on observe après le pic de 2050 des scénarios B2 et B3, un retour à la récolte de 2020 en 2080 faute de bois disponible. Le phénomène de baisse de récolte en résineux, en particulier en BO, au profit des feuillus, surtout en BIBE, s'accroît.

L'évolution de la demande se traduit notamment par une **augmentation des besoins en BO résineux, et une hausse globale des volumes de bois nécessaire dès 2035** (cf. figure 19).

Il convient de noter que la traduction de l'évolution de la demande projetée en volumes de BO, BIBE et déchets nécessaires repose sur les hypothèses suivantes :

- La demande en bois énergie est basée sur le bouclage biomasse de la modélisation ministérielle de la SFEC (run 1 du scénario AME) qui inclut 3 catégories : les ressources primaires et connexes, les déchets de bois en fin de vie et les dérivés de l'industrie du bois (boues de papeterie, liqueur noire etc.). Les demandes en ressources primaires et connexes ainsi que les dérivés de l'industrie du bois ont été placés dans la demande en BIBE et connexes et la demande en déchets en fin de vie dans la demande en déchets post-consommateur.
- La demande en bois associée à la demande de panneaux de process a été répartie entre la demande en BIBE/connexes et les déchets sur la base de la disponibilité en matière recyclée.

Les tableaux suivants de confrontation entre l'offre et la demande permettent d'évaluer plus précisément d'éventuels décalages qui pourraient exister en projection par type de bois récolté (essence et qualité potentielle).

Cette confrontation est limitée par les aspects suivants :

- Elle ne tient pas compte des imports et exports : si l'offre ne parvient pas à combler la demande, le différentiel est négatif puisqu'on n'inclut pas les imports. De même, il est possible que le volume de récolte nécessaire soit disponible mais qu'il soit exporté et donc indisponible pour la demande française ;
- La demande calculée n'est pas exhaustive. En effet, certains volumes de bois non négligeables ne sont pas couverts par les évaluations de demande (par exemple les bois de coffrage, les marchés non caractérisés comme le bricolage etc.) ;
- L'offre n'est pas forcément adaptée à la demande. Il est possible que tout le BO potentiel ne puisse pas être utilisé en sciage ou en déroulage.

Afin de pallier en partie cette limitation, le différentiel entre l'offre de 2035 (respectivement 2050) et de 2019 est confronté au différentiel entre la demande de 2035 (respectivement de 2050) et 2019. Ainsi la demande supplémentaire sur les marchés identifiés dans la section 4.4 est comparée avec l'offre supplémentaire mise à disposition par la forêt française. En effet, le différentiel permet de neutraliser les problématiques évoquées ci-dessus : on fait ainsi l'hypothèse que les volumes importés et exportés, les volumes de BO non utilisés en sciages et en déroulage et le volume de demande non caractérisé, sont les mêmes pour les deux horizons de temps. Cette approche a cependant ses limites également : par exemple, une diminution de l'import ou une augmentation de l'export entre 2019 et 2035 permettraient de réduire un excédent d'offre ou les volumes de BO non valorisés en BO pourraient l'être à l'horizon 2035 rendant l'offre compatible avec la demande. La confrontation des valeurs absolues d'offre et de demande et la confrontation entre l'offre additionnelle et la demande additionnelle sont deux analyses complémentaires.

Figure 19 : Traduction de l'évolution de la demande en volume de BO/BIBE

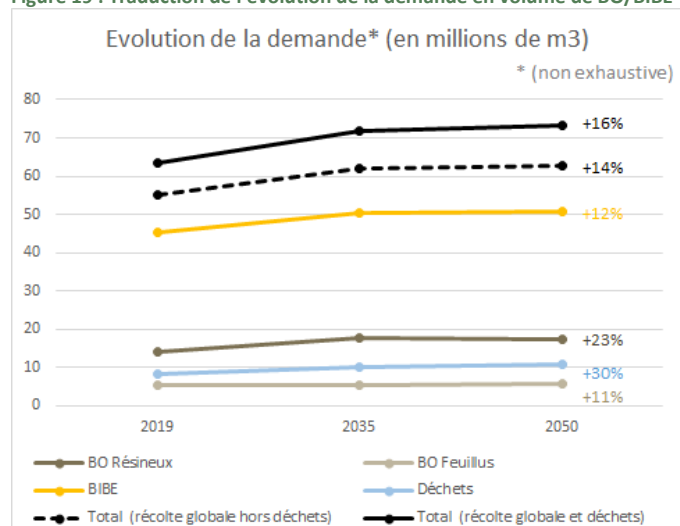


Figure 20 : Evolution de l'offre issue de forêt par essence et qualité potentielle

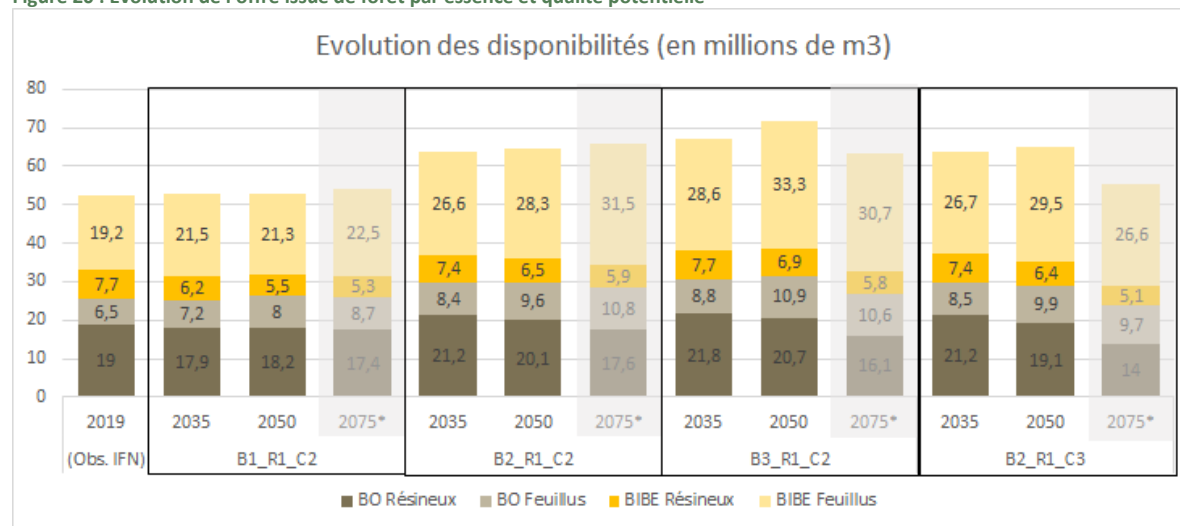


Tableau 9 : Confrontation entre l'offre et la demande pour le scénario B1_R1_C2_F1 (RES = résineux, FEU = feuillu, la troisième ligne précise le calcul réalisé à partir des autres colonnes)

Scénario B1_R1_C2_F1	BO (Mm³)									BIBE et connexes (Mm³)				Déchets post-consommateur (Mm³)			BIBE, connexes et déchets (Mm³)	Récolte globale et déchets (Mm³)
	Demande			Offre (BO-potential)			Différentiel			Demande	Offre BIBE	Offre Connexes	Différentiel	Demande	Offre	Différentiel	Différentiel	Différentiel
	b+c	b	c	e+f	e	f	e+f-b-c	e-b	f-c	g	h	(e+f)/2	h+(e+f)/2-g	i	j	j-i	h+(e+f)/2+j-g-i	e+f+h+j-(b+c)/2-g-i
	Toute essence	RES	FEU	Toute essence	RES	FEU	Toute essence	RES	FEU	Toute essence	Toute essence	Toute essence	Toute essence	Toute essence	Toute essence	Toute essence	Toute essence	Toute essence
Volumes totaux																		
2019	19,5	14,2	5,3	25,4	19,0	6,5	5,9	4,7	1,2	45,4	26,8	12,7	-5,8	8,2	11,0	2,8	-3,0	0,0
2035	23,4	17,8	5,5	25,2	17,9	7,2	1,8	0,1	1,7	50,3	27,7	12,6	-10,0	10,0	13,7	3,8	-6,3	-5,4
2050	23,4	17,5	5,9	26,3	18,2	8,0	2,9	0,8	2,2	50,9	26,8	13,1	-10,9	10,7	14,4	3,7	-7,2	-5,7
Volumes additionnels par rapport à 2019																		
2035	3,9	3,6	0,2	-0,3	-1,0	0,7	-4,2	-4,6	0,5	4,9	0,9	-0,1	-4,2	1,8	2,7	0,9	-3,2	-5,3
2050	3,9	3,2	0,6	0,8	-0,7	1,6	-3,0	-4,0	1,0	5,5	0,0	0,4	-5,1	2,5	3,4	0,9	-4,2	-5,7

NB (pour les différents tableaux) : Les déchets ont été exprimés en m³ en utilisation une densité moyenne de 500 kg/m³.

Le différentiel correspond à la demande additionnelle entre 2035 et 2019 moins l'offre additionnelle entre 2019 et 2035.

Le BO inclut les connexes qui peuvent être utilisés pour fabriquer des panneaux, du papier ou de l'énergie. Afin de calculer la disponibilité totale par rapport à la demande totale, il est nécessaire de tenir compte du rendement moyen de production des sciages et du déroulage (ici pris à 50 % dans les calculs de différentiel des tableaux).

NB (suite, pour les 3 tableaux) : La demande et l'offre pour les déchets post-consommateurs correspondent aux déchets bois et n'incluent pas les déchets de papier et de carton. La demande en bois ronds pour la fabrication de la pâte correspond au bois vierge et est incluse dans la demande en BIBE.

2019 correspond à l'année 2019 pour la demande et aux observations IFN sur la période 2013-2022 pour l'offre. 2035, 2050 et 2075 correspondent pour l'offre aux moyennes sur 10 ans (2030-2040 pour 2035, etc.). La confrontation est réalisée jusqu'en 2050 étant donné les fortes incertitudes

Tableau 10 : Confrontation entre l'offre et la demande pour le scénario B2_R1_C2_F1 (RES = résineux, FEU = feuillu, la troisième ligne précise le calcul réalisé à partir des autres colonnes)

Scénario B2_R1_C2_F1	BO (Mm³)									BIBE et connexes (Mm³)				Déchets post-consommateur (Mm³)			BIBE, connexes et déchets (Mm³)	Récolte globale et déchets (Mm³)
	Demande			Offre (BO-potentiel)			Différentiel			Demande	Offre BIBE	Offre Connexes	Différentiel	Demande	Offre	Différentiel	Différentiel	Différentiel
	b+c	b	c	e+f	e	f	e+f-b-c	e-b	f-c	g	h	(e+f)/2	h+(e+f)/2-g	i	j	j-i	h+(e+f)/2+j-g-i	e+f+h+j-(b+c)/2-g-i
	Toute essence	RES	FEU	Toute essence	RES	FEU	Toute essence	RES	FEU	Toute essence	Toute essence	Toute essence	Toute essence	Toute essence	Toute essence	Toute essence	Toute essence	Toute essence
Volumes totaux																		
2019	19,5	14,2	5,3	25,4	19,0	6,5	5,9	4,7	1,2	45,4	26,8	12,7	-5,8	8,2	11,0	2,8	-3,0	0,0
2035	23,4	17,8	5,5	29,6	21,2	8,4	6,2	3,3	2,9	50,1	33,9	14,8	-1,4	10,2	14,5	4,3	2,9	5,9
2050	23,4	17,5	5,9	31,3	21,2	10,2	8,0	3,7	4,3	50,5	32,7	15,7	-2,1	11,0	15,5	4,5	2,3	6,3
Volumes additionnels par rapport à 2019																		
2035	3,9	3,6	0,2	4,1	2,2	1,9	0,2	-1,4	1,7	4,7	7,1	2,1	4,4	2,0	3,4	1,5	5,9	6,0
2050	3,9	3,2	0,6	5,9	2,2	3,7	2,0	-1,0	3,1	5,2	5,9	2,9	3,7	2,8	4,5	1,6	5,3	6,3

Tableau 11 : Confrontation entre l'offre et la demande pour le scénario B3_R1_C2F1 (RES = résineux, FEU = feuillu, la troisième ligne précise le calcul réalisé à partir des autres colonnes)

Scénario B3_R1_C2_F1	BO (Mm³)									BIBE et connexes (Mm³)				Déchets post-consommateur (Mm³)			BIBE, connexes et déchets (Mm³)	Récolte globale et déchets (Mm³)
	Demande			Offre (BO-potentiel)			Différentiel			Demande	Offre BIBE	Offre Connexes	Différentiel	Demande	Offre	Différentiel	Différentiel	Différentiel
	b+c	b	c	e+f	e	f	e+f-b-c	e-b	f-c	g	h	(e+f)/2	h+(e+f)/2-g	i	j	j-i	h+(e+f)/2+j-g-i	e+f+h+j-(b+c)/2-g-i
	Toute essence	RES	FEU	Toute essence	RES	FEU	Toute essence	RES	FEU	Toute essence	Toute essence	Toute essence	Toute essence	Toute essence	Toute essence	Toute essence	Toute essence	Toute essence
Volumes totaux																		
2019	19,5	14,2	5,3	25,4	19,0	6,5	5,9	4,7	1,2	45,4	26,8	12,7	-5,8	8,2	11,0	2,8	-3,0	0,0
2035	23,4	17,8	5,5	30,6	21,8	8,8	7,3	4,0	3,3	50,0	36,3	15,3	1,6	10,2	14,7	4,5	6,1	9,7
2050	23,4	17,5	5,9	31,6	20,7	10,9	8,3	3,3	5,0	50,4	40,2	15,8	5,6	11,2	16,0	4,8	10,5	14,6
Volumes additionnels par rapport à 2019																		
2035	3,9	3,6	0,2	5,2	2,9	2,3	1,3	-0,7	2,1	4,7	9,5	2,6	7,5	2,1	3,7	1,6	9,1	9,8
2050	3,9	3,2	0,6	6,2	1,8	4,4	2,3	-1,5	3,8	5,0	13,4	3,1	11,5	3,0	5,0	2,0	13,5	14,6

On peut constater que le scénario B1 ne permet pas de répondre à la demande de BIBE et de connexes en 2035 et en 2050 et ce même si on ajoute le gisement de déchets qui peut être utilisé dans une certaine mesure comme du BIBE. L'offre du scénario B2 est excédentaire en 2035 et en 2050 si l'on inclut les déchets. L'offre du scénario B3 en BIBE est excédentaire en 2035 et en 2050.

L'offre totale de BO potentiel est supérieure ou égale à la demande pour les trois scénarios y compris pour les résineux. Cependant, on peut constater en 2019 que tout le BO potentiel n'est pas utilisé dans des usages de bois d'œuvre. En effet, comme explicité en section 2.5, l'offre de BO potentiel calculée par l'IGN est "optimiste". Le décalage avec la récolte effectivement utilisée en sciage ou déroulage peut provenir d'une qualité insuffisante ou d'une inadéquation avec les exigences associées à cette utilisation, notamment pour les usages en structure. Il peut également provenir d'un manque de débouché. Si l'on veut mieux confronter l'offre et la demande à un horizon de temps donné, il est nécessaire de comparer aussi l'offre additionnelle et la demande additionnelle entre cet horizon de temps et l'année 2019.

Si l'on compare l'offre additionnelle et la demande additionnelle, le scénario B1 ne permet pas de satisfaire la demande additionnelle de BO et le différentiel est de -4,2 millions de m³ en 2035 et -3 millions de m³ en 2050 pour l'ensemble du BO, le chiffre négatif traduisant un déficit d'offre (cf. *nota bene* des tableau 9 pour le calcul du différentiel). Pour le scénario B2, le différentiel entre l'offre additionnelle et la demande additionnelle est nul en 2035 si l'on considère l'ensemble des sciages résineux et feuillus. Si l'on considère que l'utilisation des sciages est spécifique selon l'essence, alors le différentiel entre l'offre et la demande en BO résineux est de -1,4 millions de m³ en 2035. En effet, la demande se base sur le scénario volontariste de l'étude prospective de la construction bois FCBA-BIPE de 2019³⁷ qui garde la répartition résineux/feuillu actuelle dans l'utilisation du bois en construction. L'offre additionnelle devient supérieure à la demande additionnelle en 2050 de 2 Mm³ pour l'ensemble du BO mais le différentiel reste de -1 million de m³ pour le BO résineux. Pour le scénario B3, le différentiel entre l'offre additionnelle et la demande additionnelle est de 1 Mm³ en 2035 toutes essences confondues et de -0,7 millions de m³ pour le BO résineux. Pour 2050, l'offre additionnelle de BO toutes essences confondues est supérieure de 2,3 millions de m³ à la demande additionnelle. L'offre additionnelle de BO résineux est en revanche inférieure de -1,5 millions de m³ à la demande en BO résineux.

4.6 AUGMENTER L'OFFRE INDUSTRIELLE DES PRODUITS BOIS POUR LIMITER LES IMPORTATIONS

D'après les projections de la présente étude, et celles des deux scénarios de l'étude Carbone 4, la demande de bois pour le secteur de la construction devrait augmenter d'au moins 30 % à l'horizon 2050. Par conséquent, l'augmentation de la demande entraîne un recours massif aux importations. Bien que cette tendance soit relativement tolérable en cas de rareté de la ressource, elle devrait être évitée lorsque ces produits peuvent être fabriqués en France. C'est bien le cas des produits collés par exemple, qui représentent un taux de couverture de la demande nationale faible (18 % en 2021³⁸) avec une production locale de 210 M€ contre près de 515 M€ de valeur d'importations en 2021.

Il est donc crucial d'analyser les capacités productives de nos industries de bois construction, et notamment la compétitivité des produits français vis-à-vis de ceux importés. Pour mener à bien cette analyse, une exploration de l'équilibre actuel des industries du bois en France et du taux de couverture de la demande par la production nationale est menée notamment pour les produits bois construction.

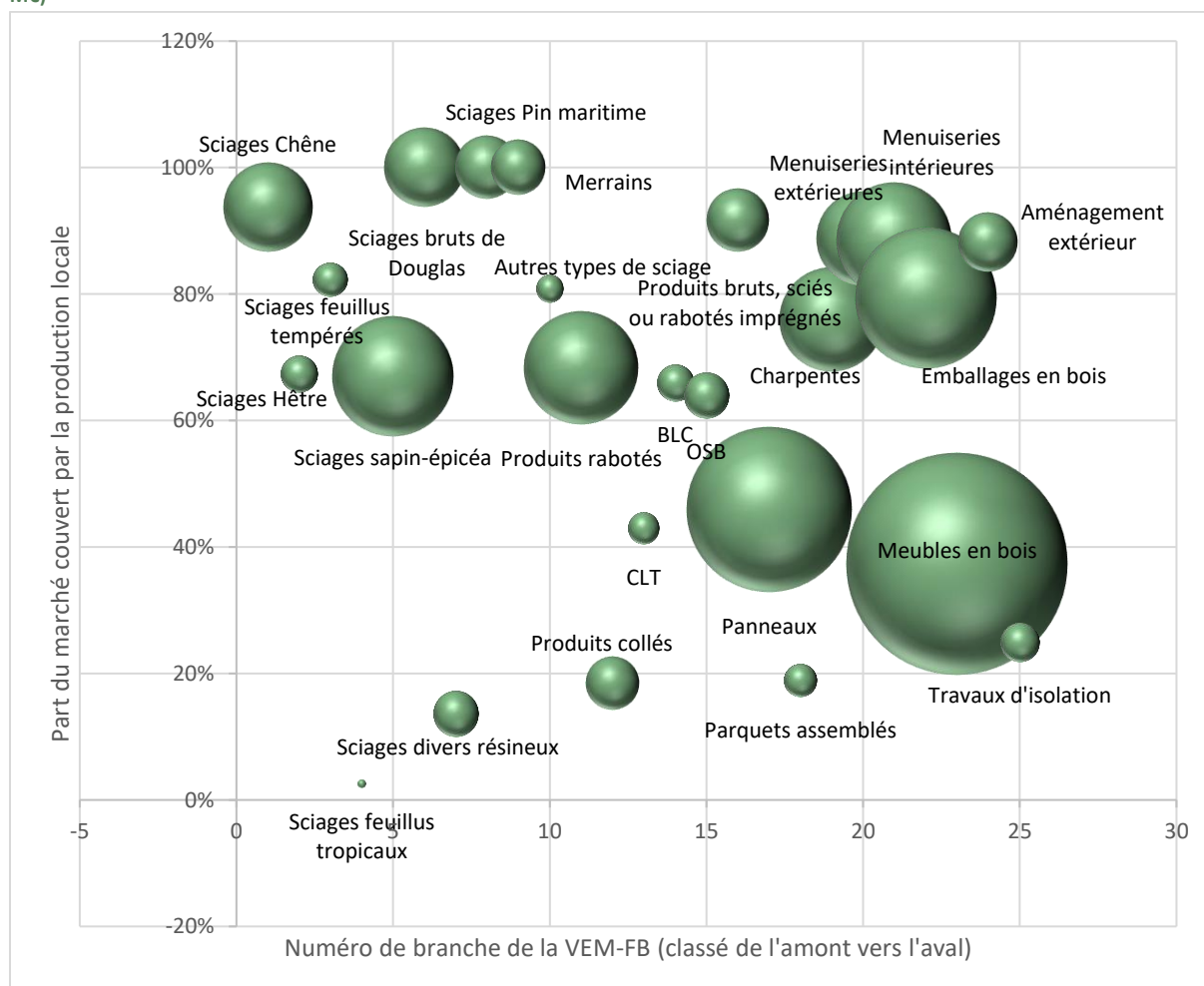
³⁷ Donadieu de Lavit et al., 2019. Etude prospective : Evolution de la demande finale du bois dans la construction, la rénovation et l'aménagement des bâtiments. BIPE, FCBA pour CODIFAB, FBF, ADEME, CSF Bois.

<https://librairie.ademe.fr/urbanisme-et-batiment/3861-etude-prospective-evolution-de-la-demande-finale-du-bois.html>

³⁸ FBF, Codifab, 2021. Données de la VEM-FB. <https://vem-fb.fr/index.php>

Durant ces dernières années, le taux de production nationale le plus élevé pour les produits bois destinés au marché de la construction concerne la fabrication de charpentes et de menuiseries extérieures et intérieures, les sciages bruts de Douglas, de chêne et de pin maritime ainsi que certains produits rabotés. Plusieurs produits comme les sciages de sapin-épicéa et les panneaux présentent un taux de production national moyen (67 % et 46 %) et pourraient être reconquis si l'industrie nationale investit davantage dans ces domaines d'activité.

Figure 21: Taux de couverture du marché par les filières locales en 2021 (taille de la bulle selon la valeur de la production nationale en M€)



NB : Le taux de couverture suit la formule suivante : $(\text{Production} - \text{Exports}) / (\text{Production} - \text{Exports} + \text{Imports})$.

Lecture du graphique : La production française couvre environ 40 % des besoins en bois pour la fabrication de meubles en bois. Ce secteur représente le plus grand chiffre d'affaires en 2021.

Source : Calculs basés sur la VEM-FB, 2021.

En effet, en confrontant les projections de demande pour le secteur de la construction (décrites plus haut) à l'offre de bois disponible à l'horizon 2050, plusieurs produits de structure bois et d'aménagement restent peu produits sur le marché français mais très demandés. Ces derniers sont pour la plupart dominés par les flux d'importation. Parmi ces produits : le Cross-Laminated-Timber (CLT), le bois lamellé collé (BLC), les panneaux OSB (Oriented-Strand-Board), les parquets et les isolants présentent une demande supplémentaire significative, en plus des sciages résineux et feuillus.

Tableau 12: Produits ayant une demande supplémentaire élevée selon nos projections

Produits bois pour la construction	Demande (en milliers de m ³ de produits, sauf isolant en milliers de tonnes)		
	2020	2035	2050
CLT	80	845	653
Bois lamellé collé	170	270	270
Sciages résineux	7 516	9 699	9 497
Sciages feuillus	1 483	1 669	1 799
Parquets	288	338	359
Isolant	476	1 000	1 000
Demande en panneau pour la construction (OSB, CP et autres)	1 047	1 252	1 617

Source : Estimations basées sur notre scénario de demande

Comme le montre le tableau 12 ci-dessus, les projections de demande de la présente étude prospective tablent sur l'accélération des parts de marché de plusieurs produits bois, notamment le CLT, l'OSB, le contreplaqué (CP) et autres panneaux pour la construction. Ce volume de demande supplémentaire modifierait le paysage de la concurrence sur le marché français, au cours des prochaines années. Dans le cas d'un moindre recours aux produits importés, l'accélération de la demande contribuerait au développement de l'industrie française ce qui permettrait de limiter l'accès aux produits importés.

Partant de ce constat, et pour répondre à cette demande croissante, France 2030³⁹ présente un dispositif qui vise à développer la compétitivité industrielle et les technologies d'avenir. Dans ce cadre, des investissements potentiels ont été employés pour accroître l'industrialisation des produits et systèmes constructifs bois et biosourcés. Cette initiative devrait permettre de résoudre partiellement les problèmes de déséquilibre de la balance commerciale en augmentant la capacité de production des entreprises françaises pour qu'elles soient plus compétitives vis-à-vis de ses concurrentes étrangères. Cette aide à l'investissement vise notamment les produits dont les besoins d'importations sont dus à un manque de moyens industriels et non à une rareté des ressources en bois.

Pour le marché des produits bois construction, France 2030 a prévu une offre industrielle additionnelle des produits suivants :

Tableau 13: Productions supplémentaires prévues par France 2030⁴⁰

Produits	Offre additionnelle France 2030 (en milliers de m ³ /an) sauf isolant (en kt/an)
Sciages résineux	1152
Sciages feuillus	48
CLT	240
Bois lamellé collé	103
OSB	750
CP	15
Parquets (chêne principalement)	20
Isolant	95

³⁹ MTECT, 2023. France 2030 et les ambitions en matière de transition écologique. <https://www.ecologie.gouv.fr/france-2030-et-ambitions-en-matiere-transition-ecologique>

⁴⁰ ADEME, 2023. Mesures France 2030 pour la filière forêt bois. https://driaaf.ile-de-france.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/07-presentation_france_reliance_2030_ademe_crfb_10-10-23.pdf

En confrontant la demande en produits de construction bois avec l'offre industrielle additionnelle d'ici 2030, on remarque une nette amélioration du taux de couverture du marché par les filières locales. En effet, ce taux permet de calculer la proportion de la production nationale (destinée au marché français) permettant de couvrir la demande française, il est calculé selon la formule suivante : $(\text{Production} - \text{Exports}) / (\text{Production} - \text{Exports} + \text{Imports})$.

Tableau 14: Comparaison des taux de couverture de la demande par l'offre actuelle (2021) et future (avec le plan France 2030)

Produits	Taux de couverture du marché par les filières locales (2021)	Taux de couverture du marché par les filières locales (2030)
Sciages résineux	69 %	74 %
Sciages feuillus	71 %	73 %
CLT	51 %	67 %
Bois lamellé collé	66 %	73 %
Panneaux pour la construction (OSB, CP et autres)	33 %	68 %
Parquets	22 %	24 %
Isolant	25 %	69 %

L'objectif de ce tableau 14 est de comparer la situation de l'offre industrielle actuelle avec celle projetée en 2030 si les aides à l'investissement prévues par le plan de relance de la production locale se concrétisent d'ici 2030. On remarque qu'avec l'augmentation de la production locale, plusieurs produits atteindraient un taux de couverture du marché très significatif, comme le CLT, les panneaux pour la construction (OSB, CP) et les isolants à base de fibres de bois.

Cela démontre qu'à des niveaux d'importations et d'exportations égales, l'offre industrielle additionnelle du marché local aurait la capacité de mieux répondre aux besoins croissants de ces produits et limiter leurs importations. Il est donc recommandé d'accroître les investissements dans ces secteurs d'activité car ils reflètent une demande de consommation nationale en croissance. Cette demande pourrait être satisfaite par une augmentation des capacités productives et une meilleure organisation des filières.

Pour d'autres produits, comme les sciages résineux et le Bois lamellé-collé (BLC), ainsi que les sciages feuillus et les parquets, le taux de couverture du marché par les filières nationales reste pratiquement stable même avec l'offre additionnelle prévue en 2030. Cette stabilité témoigne généralement d'un équilibre entre l'offre et la demande sur le marché local. Dans ce cas de figure, l'offre industrielle additionnelle prévue en 2030 correspond à la croissance de la demande, ce qui signifie que l'ajout de capacités productives est déjà en adéquation avec les besoins du marché local.

En résumé, plusieurs produits bois, dont ceux mentionnés dans le tableau 14, présentent un potentiel significatif pour le marché français, de plus leur couverture de production nationale s'intensifie progressivement. Ces divers produits bois offrent des possibilités variées dans les secteurs de la construction et de l'aménagement, qu'il s'agisse d'éléments structurels, de revêtements de sol ou de meubles. Avec l'accroissement des investissements dans la production nationale de ses produits, l'offre industrielle additionnelle permettrait de limiter l'accès aux produits importés dont l'importation n'est pas motivée par la rareté des ressources.

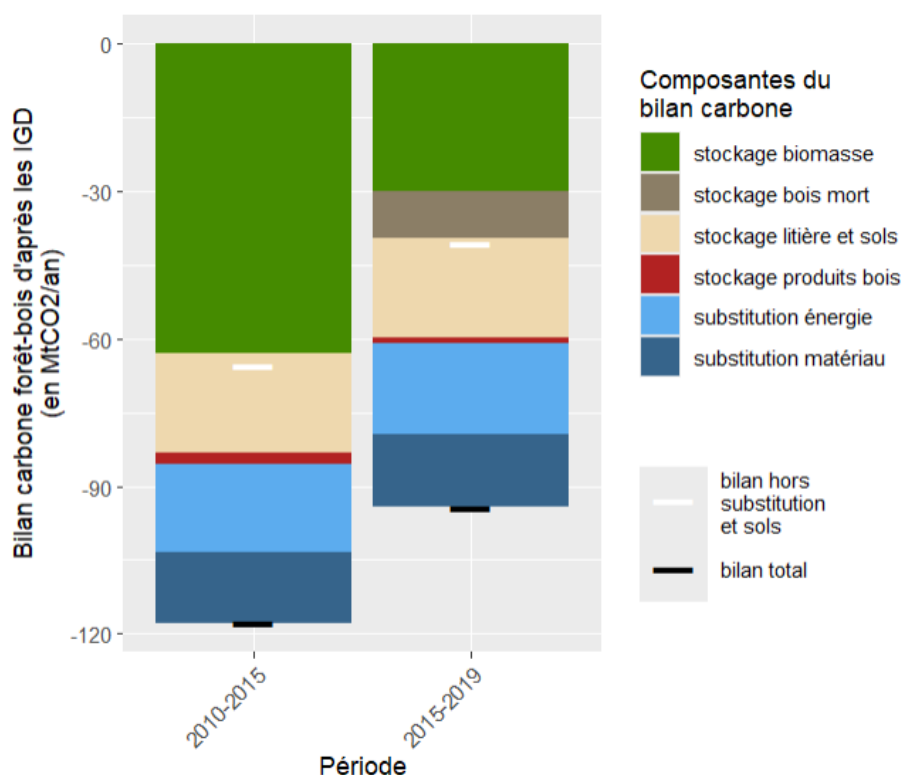
5 BILAN CARBONE DE LA FILIERE FORÊT-BOIS

5.1 LES DIFFERENTES COMPOSANTES DU BILAN CARBONE DE LA FILIERE FORET-BOIS

Par le processus de la photosynthèse, les arbres absorbent du CO₂ qui se retrouve stocké dans le bois des arbres vivants, puis dans les produits en matériau bois lorsque ces arbres sont coupés ou dans le bois mort et dans les sols lorsque ces arbres meurent. Ces **stocks de carbone** représentaient en 2019 plus de **2,8 milliards de tonnes de carbone dans les écosystèmes forestiers, pour moitié dans la biomasse vivante ou morte et pour moitié dans les 30 premiers centimètres de sols et de litière**, auxquels s'ajoutent environ **90 millions de tonnes de carbone présentes dans les différents produits en matériau bois** mis en œuvre (source : Indicateurs de Gestion Durable 2020⁴¹).

Ces réservoirs importants de carbone peuvent s'accroître, ou inversement diminuer en fonction de différents flux, notamment via l'accroissement biologique des arbres (stockage de carbone dans le bois via la photosynthèse), la mortalité (relargage progressif du carbone lors de la décomposition du bois mort), les coupes de bois et l'utilisation de ces récoltes en matériaux (transfert d'une partie du stock de carbone des arbres vers les produits bois) ou pour l'énergie (libération du carbone dans l'atmosphère lors de la combustion). Par ailleurs, l'effet substitution, c'est-à-dire l'utilisation du bois à la place d'énergies fossiles et de matériaux plus énergivores que le bois, permet également d'éviter des émissions de carbone dans l'atmosphère.

Figure 22 : Bilan carbone du secteur forêt-bois métropolitain des dernières années par composante et par période sur les années récentes (source : Indicateurs de Gestion Durable 2020 – IGD)



NB : Pour le stockage supplémentaire chaque année dans le compartiment de la litière et des sols, la valeur fournie dans les IGD se base sur le réseau RENECOFOR dont les données font référence à la période 1995-2010. Les coefficients de substitution moyens utilisés dans les IGD sont supérieurs à ceux plus détaillés et précis appliqués dans la présente étude, les valeurs de l'effet substitution du graphique sont donc surestimées par rapport aux calculs des simulations

⁴¹IGN, 2020. Indicateurs de Gestion Durable. <https://foret.ign.fr/IGD/fr/indicateurs/1.4>

Ces dernières décennies, la croissance des forêts françaises, tant en surface qu'en volume, a permis l'augmentation des stocks de carbone et font historiquement de l'écosystème forestier un "puits de carbone", contribuant ainsi à la lutte contre l'augmentation de l'effet de serre. Cependant, du fait notamment de la dégradation des conditions climatiques affectant la croissance et la mortalité des arbres, **la séquestration de carbone dans les forêts a diminué de moitié ces dernières années, passant de plus de 60 MtCO₂/an à environ 30 MtCO₂/an entre 2010-2015 et 2015-2019** (cf. figure 22).

Dans les simulations de la présente étude, les composantes amont du bilan carbone forêt-bois sont évaluées grâce à l'évolution projetée des stocks sur pied en forêt, mais aussi de ceux du bois mort, variant tous les deux suivant les dynamiques naturelles et les scénarios de gestion (cf. annexe de la tâche 7.1.1). Pour des raisons techniques, la méthode d'évaluation du compartiment de stockage dans le bois mort est légèrement différente entre les IGD et les projections, les valeurs ne sont donc pas pleinement comparables entre cet état initial et celui présenté dans les résultats des scénarios. Bien que potentiellement majeur (cf. figure 22), le stockage de carbone dans les sols reste empreint de nombreuses incertitudes scientifiques ; il n'est pas intégré dans les calculs en projection mais fait l'objet d'un état de l'art approfondi (cf. annexe de la tâche 7.1.2).

La **contribution de la filière bois au bilan carbone est importante, à la fois via le stockage dans les produits, représentant autour de 2 MtCO₂/an, et à travers l'effet substitution**, estimé à une trentaine de MtCO₂/an par les IGD (cf. figure 22). Il convient cependant de noter que les IGD considèrent un seul coefficient de substitution pour tous les usages matériaux (1,1 tCO₂/m³ de bois, soit environ 1,2 tC/tC) et un seul coefficient de substitution pour les usages énergétiques (0,5 tCO₂/m³ de bois, soit environ 0,55 tC/tC). Ces coefficients correspondent aux valeurs hautes de la présente étude qui évalue les coefficients de substitution produit par produit. Les coefficients de substitution matériaux pour la phase de production varient dans l'étude entre +0,06 tC/tC (le produit bois est plus émissif que le produit concurrent) et -2 tC/tC avec une moyenne à 0,6 tC/tC ce qui est inférieur à la donnée des IGD. L'étude ajoute en revanche une substitution en fin de vie avec un coefficient spécifique qui dépend de la gestion du déchet mais qui est différée dans le temps. Les coefficients de substitution énergie varient entre 0,26 tC/tC pour le bois brûlé en insert par le particulier et 0,46 tC/tC pour le bois brûlé en centrale biomasse. Il est également tenu compte de la consommation d'énergie interne, à savoir dans les processus industriels de la filière, qui ne génère pas de substitution. En projection, la contribution de la filière dépend des évolutions de récolte projetées dans les différents scénarios "amont". Elle est estimée à partir des usages et flux de matière actuellement observés dans le secteur aval de la transformation des bois. Les possibilités d'utilisation de la récolte additionnelle par rapport à l'actuelle font l'objet de différents scénarios "aval" (cf. annexe de la tâche 7.2).

5.2 BILAN CARBONE DE L'AMONT FORESTIER

5.2.1 LE STOCKAGE DANS LA BIOMASSE VIVANTE EN FORET EST SENSIBLE AUX EFFETS DU CLIMAT ET DE LA GESTION

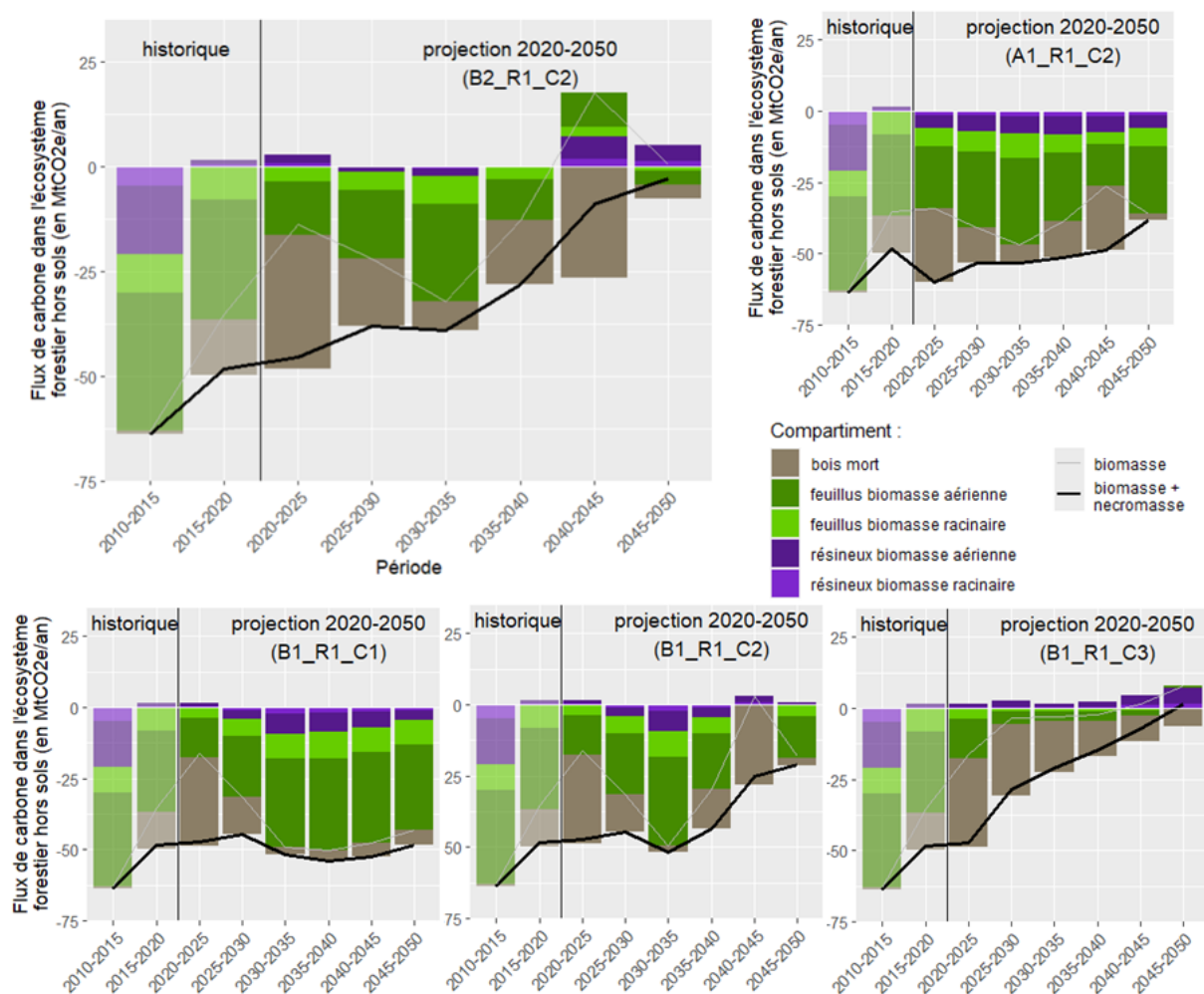
Historiquement, depuis le minimum forestier de 1850, la forêt métropolitaine n'a cessé d'être un puits de carbone, contribuant ainsi massivement à l'absorption des émissions de CO₂. Cette augmentation des stocks de carbone dans la biomasse résulte de la conjonction du phénomène d'expansion forestière en grande partie liée à la déprise agricole, et de la capitalisation des forêts liée à la jeunesse des peuplements et au changement de pratiques sylvicoles (abandon progressif des taillis). Même s'il reste encore un puits au niveau national, ce stockage de carbone en forêt tend à diminuer ces dernières années sous l'effet de la hausse de la mortalité et des prélèvements et de la baisse de la productivité des peuplements. Cet essoufflement du puits forestier est en grande partie lié à la crise actuelle (notamment les scolytes sur le stockage dans les résineux, cf. figure 22 pour la période récente) mais également à la logique d'une forêt qui vieillit et atteint progressivement un état d'équilibre (engendrant à terme un puits nul).

Dans la grande majorité des combinaisons de scénarios en projection, **la séquestration en forêt continue de s'éroder sur la période de projection 2020-2050** (hormis pour le scénario A1_C1, cf. annexe de la tâche 9), mais **reste pour la plupart des cas en moyenne positive** si l'on considère l'ensemble de la fenêtre temporelle jusqu'en 2050 (sauf pour les scénarios B2_C3 et B3_C3). Selon les périodes et les scénarios, les écosystèmes forestiers (hors sols) pourraient même passer d'un puits de carbone à une source de carbone. **Le stockage de carbone dans la biomasse vivante deviendrait alors très labile**, notamment sous l'effet de crises liées au changement climatique. Ce mécanisme est particulièrement visible dans le scénario C2 (ou la première période du scénario C1) avec un stockage qui s'effondre lors des pics de mortalité simulés (cf. courbe grise du stockage dans la biomasse dans la figure 23 ci-dessous). Ces crises ayant un impact à la fois sur la croissance, la mortalité et de façon indirecte les prélèvements, la séquestration qui est la résultante de ces trois termes, en cumule les effets. Cette valeur cumule également les incertitudes liées aux différents flux projetés, et particulièrement celles liées à l'évolution du climat et de ses effets sur les arbres (cf. chapitre 2). En s'approchant de zéro, le flux net de carbone devient par ailleurs d'autant plus sensible à la moindre variation de l'un de ses termes, pouvant facilement changer de signe. Cette variabilité peut être d'autant plus importante lorsque l'on estime la séquestration des peuplements à une échelle temporelle ou spatiale fine (poussé à l'extrême, le bilan sur une parcelle une année donnée peut être très fortement positif ou négatif en fonction des coupes ou d'autres événements). Il convient donc d'analyser ces résultats sur des périodes suffisamment larges et au niveau national, permettant d'agréger des peuplements à différents stades d'évolution et de lisser les phénomènes de crises.

Toujours est-il que l'impact du climat sur le stockage de carbone en forêt est majeur. Pour le scénario de gestion B1, l'amplitude du stockage moyen dans la biomasse vivante sur la période 2020-2050 varie entre 40 MtCO₂e/an (et 2,3 tCO₂e/ha/an) séquestrées pour le scénario optimiste C1 et 3 MtCO₂e/an (et 0,2 tCO₂e/ha/an) séquestrées pour le scénario pessimiste C3. Ce sont les feuillus, dont le stockage est à l'heure actuelle le plus fort et dont la part dans la forêt française est la plus importante, qui contribuent le plus à la séquestration dans les arbres vivants et qui représentent le plus grand potentiel de variation de cette séquestration (cf. figure 23). **Selon les effets du climat à venir, l'enjeu pourrait passer de celui d'un "renforcement de la pompe à carbone" à celui de la "préservation des stocks de carbone"** des arbres qui représentent plusieurs centaines de millions de tonnes d'équivalent CO₂.

Les scénarios de gestion influencent également fortement le stockage dans la biomasse, notamment via l'effet direct de la décapitalisation liée aux coupes de bois. Ainsi, pour le scénario C2, le stockage moyen dans la biomasse vivante sur la période 2020-2050 varie de 37 MtCO₂e/an (et 2,2 tCO₂e/ha/an) séquestrées pour le scénario A1 à 4 MtCO₂e/an (et 0,2 tCO₂e/ha/an) séquestrées pour le scénario B3, avec des valeurs intermédiaires de 24 MtCO₂e/an (et 1,4 tCO₂e/ha/an) pour le B1 et de 10 MtCO₂e/an (et 0,6 tCO₂e/ha/an) pour le B2. Au niveau strict de la séquestration en forêt, un des enjeux de comparaison des scénarios de gestion est d'évaluer s'il est préférable de stocker moins en forêt à court terme pour renouveler les peuplements, anticiper le changement climatique et limiter le risque d'exposition du capital sur pied aux aléas, ou si au contraire il est nécessaire de privilégier à tout prix le stockage de carbone en forêt à court terme en partant du principe que le CO₂ stocké à l'heure actuelle aurait plus d'intérêt que celui stocké dans quelques décennies. Mais plus globalement, l'analyse de scénarios de gestion rend nécessaire de prendre en compte l'ensemble des composantes du bilan carbone de la filière forêt-bois, la récolte de bois ayant certes un impact sur le stockage de carbone en forêt, mais au moins en partie contrebalancé par le stockage dans les produits bois et par les effets de substitution. Par ailleurs, il est également nécessaire de considérer les autres conséquences des choix de gestion en forêt, qu'ils soient économiques pour répondre à une multitude d'usages du bois par une multitude d'acteurs particuliers et industriels et permettre le fonctionnement ou le développement d'un secteur d'activité, mais aussi environnementaux et sociétaux avec les questions de préservation de la biodiversité, de vulnérabilité d'exposition aux risques, d'adaptation des forêts au changement climatique, etc.

Figure 23 : Flux de carbone dans l'écosystème forestier par compartiment (biomasse et nécromasse, hors sols et litière) pour la période récente et en projection à l'horizon 2050



NB : Les scénarios B2_R1_C2 (en haut à gauche), B1_R1_C1, B1_R1_C2, B1_R1_C3 (en bas) et A1_R1_C2 (en haut à droite)

Tableau 15 : Stockage de carbone moyen annuel à l'hectare (biomasse uniquement) selon l'origine des surfaces forestières

Origine des surfaces	Surface en 2050 (17 030 000 ha au total)	Stockage de carbone moyen annuel à l'hectare sur la période 2020-2050 (tCO ₂ e/ha/an)				
		A1_R1_C2	B1_R1_C1	B1_R1_C2	B1_R1_C3	B2_R1_C2
Expansion forestière	700 000 ha	3,0	3,1	3,0	2,7	3,0
Plan de renouvellement	600 000 ha + 105 000 ha de terres en déprise	5,0	5,1	5,0	4,3	5,0
Peupleraies (hors plan)	150 000 ha	2,1	2,3	2,1	1,5	2,1
Autres forêts	15 480 000 ha	2,4	2,5	1,5	0,2	0,7

NB : Dans ce tableau, les valeurs positives de stockage dans la biomasse vivante correspondent à un puits, et les négatives à une source. Afin de s'extraire des variations de surfaces dans cette analyse, le stockage moyen annuel à l'hectare est ici calculé par la différence entre le stock de carbone à l'hectare en 2050 avec celui de 2020, cette valeur ne peut donc pas directement être multipliée à la surface pour retrouver le stockage total en absolu.

La séquestration de carbone dans la biomasse vivante présente des dynamiques différentes en fonction des essences et de l'origine des peuplements. Les résineux, faisant l'objet d'un prélèvement plus important, stockent proportionnellement moins que les feuillus (cf. figure 23). Les surfaces d'accrus forestiers, souvent jeunes et peu gérés, ont une fonction de stockage relativement favorable. Toutefois, ce sont les peuplements issus du plan de renouvellement qui absorbent le plus de carbone pour une surface donnée. Ce phénomène est lié à la productivité des essences choisies, mais également au niveau de maturité de ces peuplements sur la période observée (2020-2050), avec des plantations jeunes ayant une croissance forte et ne faisant pas encore l'objet de coupes (cf. tableau 15).

5.2.2 LE BOIS MORT AURAIT UN EFFET TAMPON PEU DURABLE DANS LE STOCKAGE DE CARBONE EN FORÊT

Au-delà du stockage dans la biomasse vivante, la figure 23 précédente montre la forte contribution potentielle du bois mort dans le stockage global de carbone en forêt. Cependant, ces résultats de stockage sont à mettre en perspective des stocks initiaux de bois mort et de la durée de demi-vie utilisée pour la décomposition de ce bois. Tout d'abord, cette durée de demi-vie fixée ici à 10 ans quels que soient les types de bois (diamètre, essence...) et les conditions de décomposition (station, climat...), est une moyenne entachée d'une grande variabilité et intégrant une forte part d'incertitudes scientifiques (cf. annexe de la tâche 7.1.1). Par ailleurs, cette durée relativement courte témoigne de la non-pérennité d'un stockage dans le bois mort. Les stocks actuels de carbone dans le bois mort en forêt (environ 150 millions de tC) sont en effet marginaux au regard des stocks de carbone dans la biomasse (plus de 1,3 milliard de tC). Un fort stockage sur une période donnée, ne peut donc qu'être temporaire. Ce phénomène est d'ailleurs visible dans les projections, avec des stockages importants dans le bois mort durant les périodes de crise, mais ne se poursuivant pas lors des accalmies. Cela a pour conséquence de créer une sorte **“d'effet tampon” des crises et de lisser le stockage total** au niveau de l'écosystème dans un scénario par “vagues” (le stock de carbone transite des arbres vifs aux arbres morts pendant la crise dans le scénario C2, cf. figure 23), **et de temporiser en retardant de quelques années la chute du puits forestier** dans un scénario pessimiste des effets du climat sur les arbres (le stockage de carbone dans le bois mort diminue avec un effet retard dans le scénario C3, la mortalité finissant inexorablement pas baisser faute d'arbres vifs exposés aux aléas, cf. figure 23).

Une analyse centrée sur le carbone indique que **le stockage dans ce compartiment n'est pas durable** et souligne l'enjeu de valoriser les arbres dépérissants dans des produits bois à longue durée de vie plutôt que de les laisser mourir en forêt. Au niveau de la comptabilité carbone, l'action de prélever ce bois est positive si la moyenne de ses usages (connexes compris) a une durée de vie supérieure à celle du bois mort. Cependant, il convient de prendre en compte les autres conséquences favorables et défavorables d'une augmentation des stocks de bois mort en forêt, sur l'environnement (organismes xylophages, retour de minéraux au sol...) mais aussi sur les risques (combustible d'incendies...). Ces conséquences sont variables suivant le type de mortalité, d'une mortalité diffuse et relativement courante souvent favorable à la biodiversité ou à l'inverse une surmortalité massive impactant de larges surfaces devenant improductives et vulnérables au risque d'incendie. Par ailleurs, ces stocks de carbone de bois mort alimentent également en partie le stock de carbone du sol, avec des effets positifs à court terme, mais pas nécessairement à long terme (cf. paragraphe 5.2.3 suivant). Dans tous les cas, ces questions nécessitent encore des travaux pour permettre des analyses plus approfondies à large échelle et dans un cadre de changement climatique (décomposition, retour au sol, distinction des types de mortalité, etc.).

5.2.3 LES SOLS : UN PUIIS DE CARBONE ACTIF MAIS EMPREINT D'INCERTITUDES

Si les sols forestiers représentent un réservoir majeur de carbone, avec plus de 1,4 milliards de tonnes de carbone soit près de la moitié des stocks en forêt, l'évolution de ces stocks sur l'horizon de la projection est en revanche plus difficilement quantifiable. Le stockage de carbone dans les sols forestiers est la résultante entre les apports de carbone provenant des feuilles, du bois mort et des racines et les pertes de carbones liées à la décomposition ou la lixiviation dans les sols. Le bilan des flux entre ces différents processus est variable en fonction du stock initial de carbone (davantage de stockage dans un sol initialement pauvre en carbone, comme c'est le cas dans de jeunes forêts), et de l'importance des apports de matière organique (souvent importants en forêt) ou de la vitesse de décomposition de celle-ci (plutôt lente en forêt). Une analyse bibliographique approfondie menée par INRAE et des chercheurs internationaux en science du sol (cf. annexe de la tâche 7.1.2) a permis de confronter les valeurs de stockage de carbone dans les sols forestiers, issues de mesures de terrain, de méta-analyses ou de modélisation.

Sur la période récente, ces différentes sources de données convergent pour indiquer que les sols forestiers français constituent un puits actif de carbone. La gamme de valeurs du stockage à l'échelle nationale est toutefois large et varie entre 130 et 430 kgC/ha/an en fonction de la méthodologie employée. A cette grande variabilité à l'échelle nationale, vient s'ajouter une forte variabilité régionale et même locale qui est dépendante notamment de l'origine des sols ou du climat, et difficile à appréhender sans biais de représentativité et de façon moyenne à large échelle (cf. annexe de la tâche 7.1.2). Si l'on peut raisonnablement **estimer un puits de carbone dans sols forestiers actuels de l'ordre de 200 kgC/ha/an soit environ 12 MtCO₂e/an à l'échelle nationale, cette dynamique de stockage ne peut être considérée comme acquise sur le long terme**. En effet, l'évolution des stocks de carbone à l'avenir est dépendante de multiples facteurs pouvant favoriser ce flux de carbone (poursuite de l'expansion forestière sur des sols actuellement pauvres en carbone, densification et vieillissement des peuplements), ou au contraire, le réduire voire l'inverser (atteinte d'un niveau d'équilibre des stocks de carbone à terme dans des forêts stables, diminution des apports de biomasse à cause du changement climatique, ou du fait de pratiques de gestion).

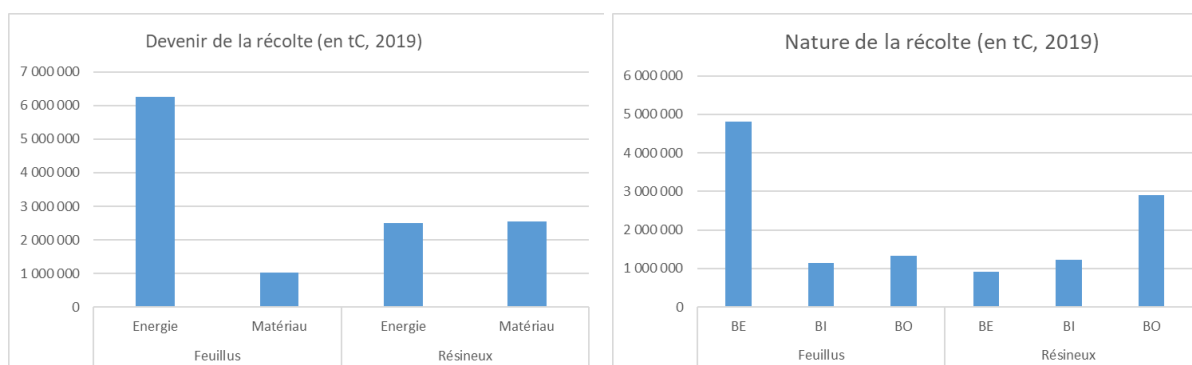
En l'état actuel des connaissances sur l'évolution incertaine du stockage de carbone à l'avenir et dans l'attente de nouvelles données sur ce sujet via les remesures du réseau de mesure pour la qualité des sols (RMQS), il a été décidé de ne pas inclure le compartiment des sols et de la litière dans les calculs en projection. Ce choix induit probablement une sous-estimation de la force de puits des forêts, mais est justifiée par les fortes incertitudes observées. Ce sujet fait l'objet de besoins de recherche importants, parmi lesquels les travaux du PEPR FairCarboN pourraient apporter des éléments de modélisation sur le futur. Il convient cependant de rappeler l'importance de ce compartiment et les enjeux autour de la préservation des stocks de carbone dans les sols, passant par diverses mesures de gestion sylvicole adaptées et de limitation des perturbations et du travail du sol en fonction des types de forêts (cf. annexe tâche 7.1.2).

5.3 BILAN CARBONE DE LA FILIERE AVAL

Les produits en bois dépendent des essences (feuillus, résineux) et des compartiments récoltés, qui peuvent être valorisés sous différentes familles d'usages (bois d'œuvre BO, bois d'industrie BI, bois énergie BE). Les données de l'IFN ne permettent pas de différencier le bois d'industrie et le bois énergie, ces deux usages étant alimentés avec les mêmes types de bois (cf. paragraphe 2.5). La répartition entre les deux a été estimée par FCBA sur la base de données statistiques (cf. annexe de la tâche 7.2).

5.3.1 LES USAGES ACTUELS SE CARACTERISENT PAR UNE VALORISATION DES FEUILLUS ESSENTIELLEMENT EN ENERGIE POUR L'USAGE DOMESTIQUE ET DES RESINEUX PRINCIPALEMENT EN MATERIAU

Les graphiques suivants de la figure 24 montrent la répartition actuelle de la récolte française (hors déchet) entre les différentes essences, compartiments et produits fabriqués.



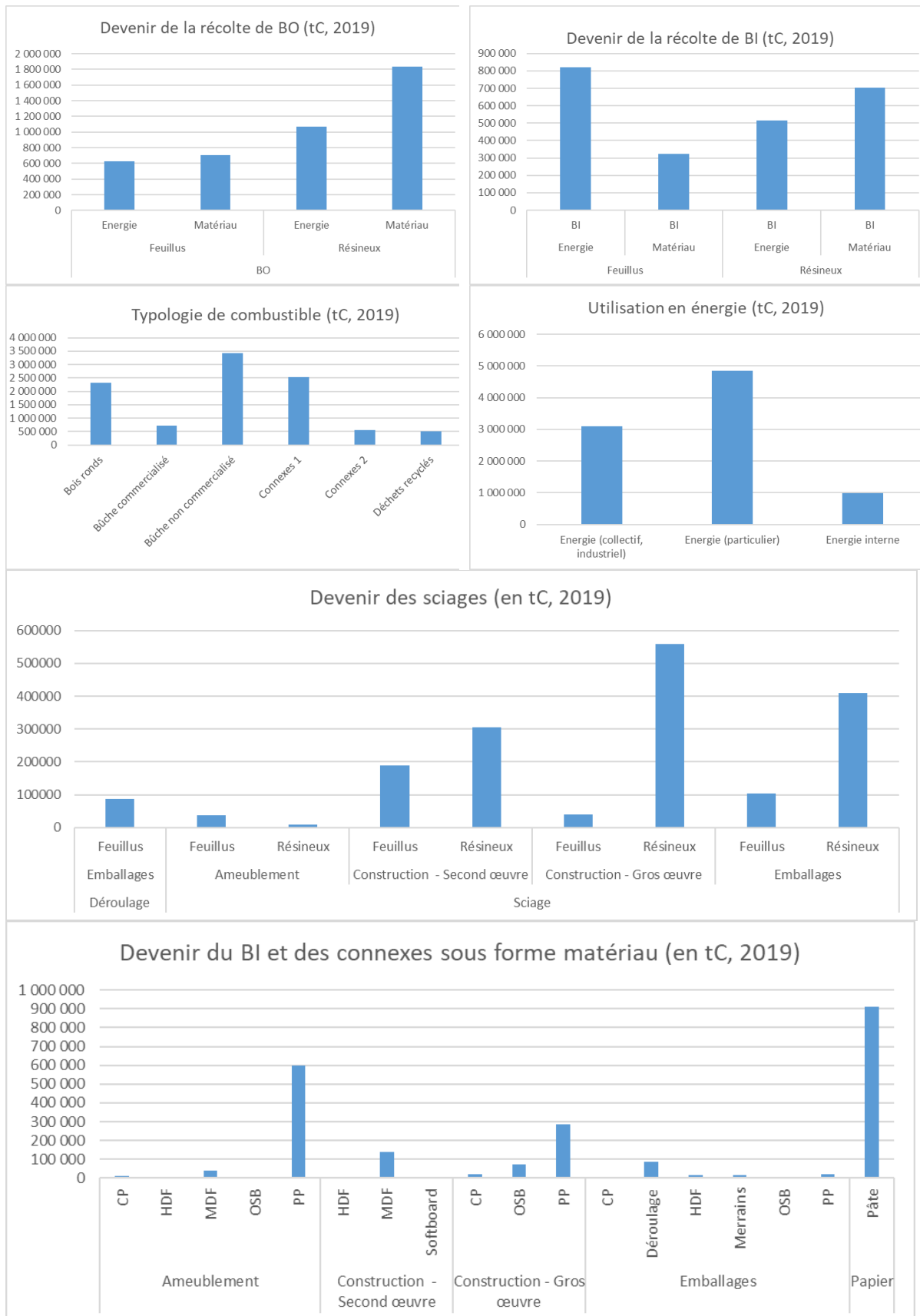
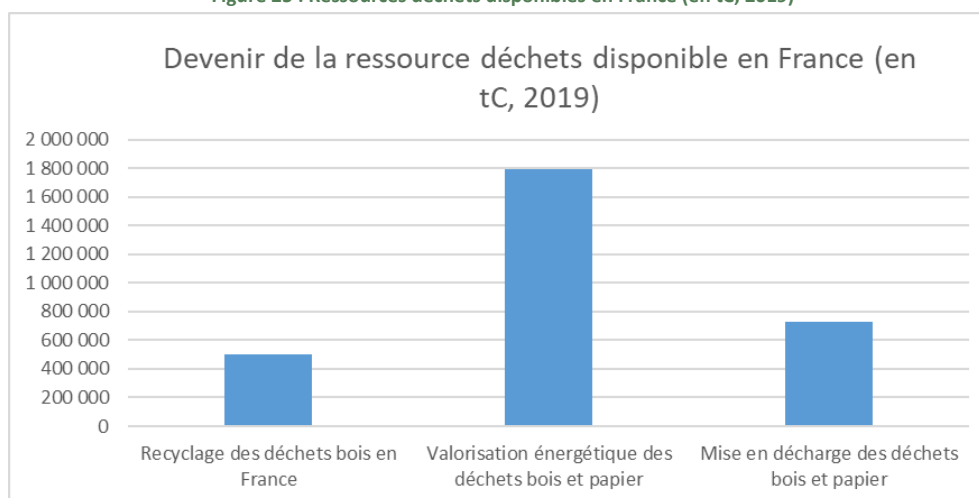


Figure 24 : Répartition de la récolte de 2019 par compartiment, essence et produits

Le devenir des déchets bois et papier générés en 2019 est présenté dans le graphe suivant.

Figure 25 : Ressources déchets disponibles en France (en tC, 2019)



- NB :** - Dans ces graphes, le BO correspond au volume de bois rond utilisé en sciage ou en déroulage,
- L'énergie interne correspond à l'énergie utilisée par la filière forêt bois pour ses propres besoins (séchage des sciages, presse des fabricants de panneaux etc.).
- On comptabilise ici le devenir ultime du BO ou du BIBE : ainsi un connexe de seconde transformation du BO utilisé en énergie est comptabilisé en utilisation énergétique.
- Les tonnages de papier recyclés n'apparaissent pas dans la figure 25. En effet, la durée de vie du papier considérée dans le modèle CITEPA intègre les boucles de recyclage. Lorsque le tonnage de papier « sort » du système, il est considéré comme valorisé énergétiquement (45,6 %) ou mis en décharge (54,5 %).
- Les tonnages de bois recyclé à l'export (38 %) n'apparaissent pas dans la figure 25.

Le devenir de la récolte de 2019 est caractérisé par les éléments suivants :

- La récolte de 2019 est principalement utilisée en énergie pour les feuillus. Pour les résineux, il y a un équilibre entre l'usage matériau et l'usage énergétique ;
- On observe une forte prépondérance du bois énergie feuillu composé principalement de bois bûche utilisé par les particuliers. Le bois bûche intègre notamment la récolte non commercialisée.
- Le BO résineux est utilisé aux deux-tiers en matériau (sciages, connexes en panneaux) ;
- Le BI résineux est utilisé également principalement en matériau (panneau, papier) ;
- Les sciages sont principalement utilisés en construction notamment pour les sciages résineux ;
- Le BI utilisé en matériau l'est principalement pour la production de papier et de panneaux de particules (PP).

Etant donné qu'actuellement, **les résineux produisent plus de bois matériau tant en sciages qu'en panneaux, l'évolution vers une disponibilité surtout augmentée en feuillu** (cf. chapitre 4), même en considérant un reboisement R1, nécessite une adaptation de la filière aux essences feuillues. Un maintien ou une augmentation de la disponibilité en résineux est également un enjeu par rapport au stockage et à la substitution matériau.

5.3.2 UNE AUGMENTATION DU STOCKAGE ET DE LA SUBSTITUTION EN AVAL ASSOCIEE A L'AUGMENTATION DE LA RECOLTE

Cette section analyse l'impact des scénarios de gestion de la famille B (et donc du volume de récolte) sur le bilan carbone aval pour le scénario de reboisement R1 et le scénario d'effet du climat C2. Le schéma de filière du scénario B1_R1_C2_F1 qui considère une récolte quasi constante est identique en projection à l'actuel. Pour les scénarios B2_R1_C2_F1 et B3_R1_C2_F1, on observe une augmentation de la récolte. Les schémas de filières des scénarios en 2035 et 2050 évoluent en considérant un usage identique du bois pour le volume de récolte correspondant à celui de 2019 et à un schéma correspondant à une satisfaction de la demande telle que définie en section 2.5 pour les volumes récoltés supplémentaires. La récolte de BIBE et les connexes supplémentaires

sont utilisés à 71 % en énergie et 24 % en panneaux destinés à la construction et 5 % en panneaux destinés à l'ameublement en 2035 et cette répartition est similaire en 2050. Les sciages supplémentaires produits sont utilisés à 92 % en construction et à 8 % en emballage (contre 75 % en construction et 25 % en emballage en 2050).

Le bilan carbone aval inclut le stockage dans les produits bois, la substitution matériau et la substitution énergie. Le stockage de carbone dans les produits correspond à la variation de stock annuelle de produits bois exprimée en tonnes équivalent CO₂ sachant que le bois anhydre est constitué à 50 % de carbone. Il est calculé en utilisant la méthodologie du GIEC pour les produits ligneux récoltés⁴² (voir annexe de la tâche 7.2).

Le calcul de substitution est nécessaire pour comparer les scénarios entre eux car, selon le niveau de récolte et le schéma de filière, les quantités et la nature des produits bois fabriqués sont différents. Selon les objectifs de l'étude, les calculs de substitution peuvent être différents. La présente étude répond à deux objectifs :

- Un objectif de comptabilité, à savoir évaluer l'impact direct du système forêt bois mais également l'impact de son interaction sur les autres systèmes (autres sources d'énergie, autres matériaux). Cela correspond à la situation C du guide ILCD⁴³.
Selon Cornillier & Benoist (2015)⁴⁴, l'impact de l'interaction avec les autres systèmes est calculé sur la base du mix moyen des produits évités par l'utilisation du bois et considérant l'impact de l'ensemble des produits. Le détail de ce calcul de substitution est donné en annexe de la tâche 7.2.
- Un objectif d'aide à la décision, à savoir contribuer à la prise de décision au niveau national, soit à un niveau macro-économique (on peut nuancer ce propos en notant qu'un choix au niveau du massif serait plus pertinent). Ce choix permet de classer l'étude dans la situation B du guide ILCD⁴³.
Selon Cornillier & Benoist (2015)⁴⁴, l'impact de l'utilisation de produits bois doit s'évaluer en évaluant l'évolution marginale du marché des produits concurrents du bois provoquée par une décision comme ici l'augmentation de la récolte. Cette évaluation aurait nécessité l'utilisation d'un modèle marché de type équilibre partiel, ce qui n'a pas été réalisé dans cette étude. Un seul type de substitution a donc été modélisé dans le cadre de cette étude basé sur les mix moyens et faisant l'hypothèse que l'ensemble des produits font l'objet d'un calcul de substitution (voir annexe de la tâche 7.2).

On peut distinguer deux cas de substitution :

- la substitution énergie consiste à évaluer les impacts du bois énergie venant se substituer aux ressources fossiles telles que le charbon, le fioul ou le gaz naturel ;
- la substitution matériaux consiste à évaluer les émissions fossiles évitées par l'usage du bois à la place de matériaux concurrents tels que le béton, l'acier ou l'aluminium.

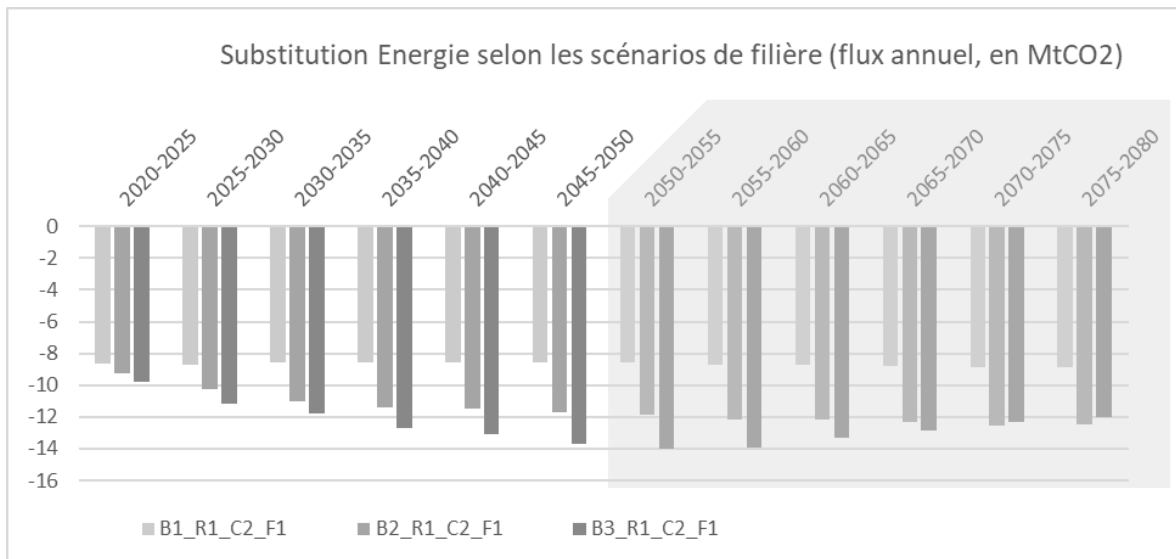
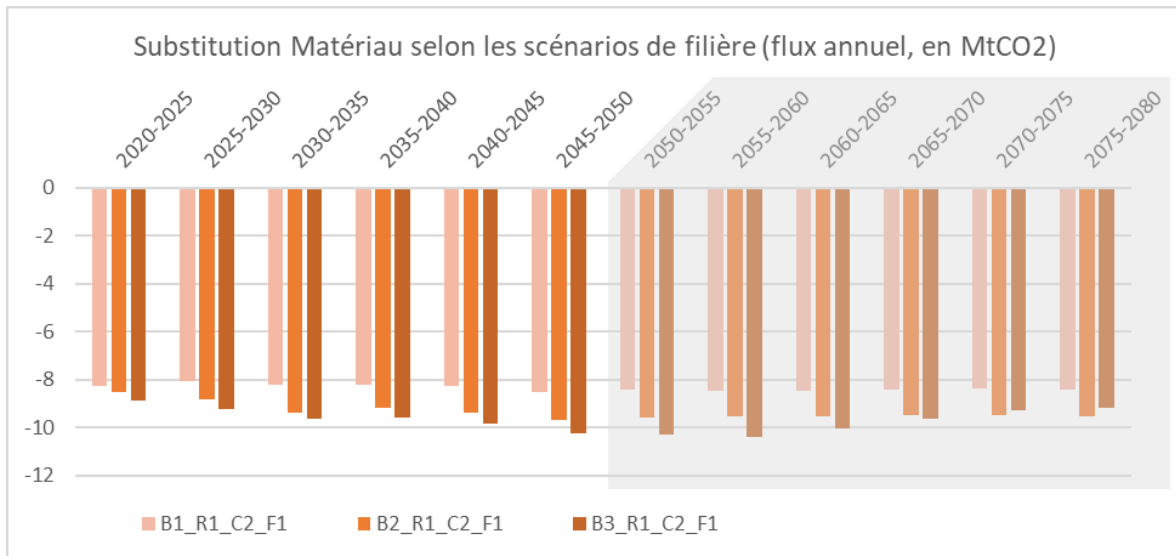
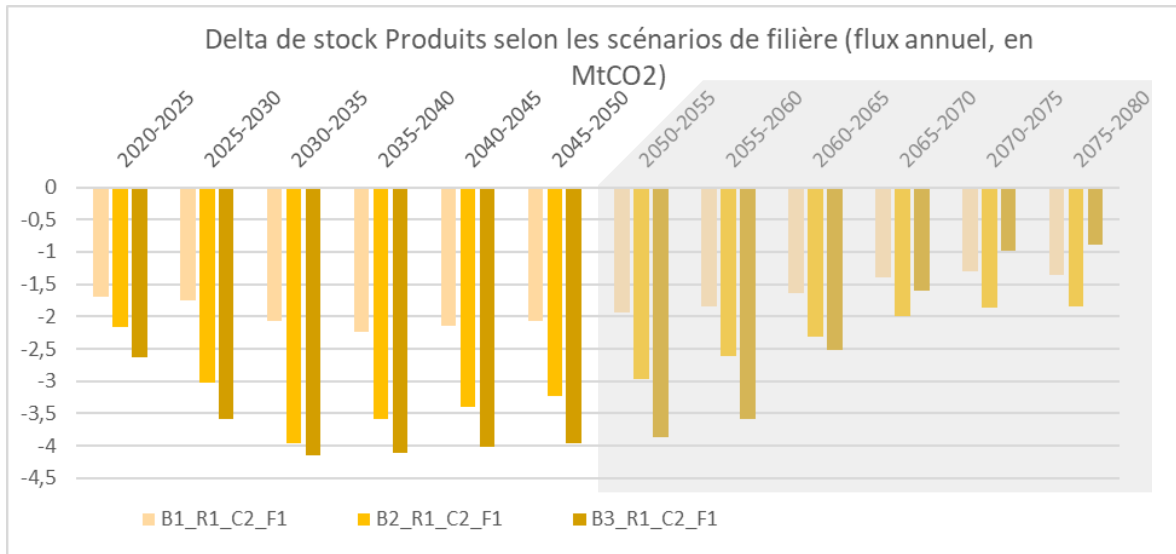
Les résultats sur le stockage dans les produits bois, la substitution matériau et la substitution énergie sont présentés dans les graphiques de la figure 26 ci-après.

⁴² Pingoud et al., 2006. Harvested wood products in "2006 IPCC Guidelines for national greenhouse gas inventories."
https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/support/Primer_2006GLs.pdf

⁴³ Joint Research Center, 2010. General guide for Life Cycle Assessment. <https://eplca.jrc.ec.europa.eu/uploads/ILCD-Handbook-General-guide-for-LCA-DETAILED-GUIDANCE-12March2010-ISBN-fin-v1.0-EN.pdf>

⁴⁴ Cornillier & Benoist, 2015. Etude préliminaire à la réalisation de bilans environnementaux sur le chauffage au bois. Partie 3 : Recommandations méthodologiques. https://publications.cirad.fr/une_notice.php?dk=580230

Figure 26 : Bilan carbone aval des scénarios de récolte



Le **stockage annuel dans les produits bois varie entre 0,89 MtCO₂ et 4,2 MtCO₂** selon le scénario et l’horizon de temps. L’augmentation de récolte de 20 % (scénario B2 par rapport à B1) permet d’augmenter le stockage annuel de carbone de 60 % en 2035, de 50 % en 2050 et de 35 % en 2080. L’augmentation de récolte de 30 % (scénario B3 par rapport à B1) permet d’augmenter le stockage annuel de carbone de 80 % à 100 % en 2035 et 2050, avec toutefois un moindre stockage en 2080 (-34 %). Cette diminution du stockage pour le scénario B3 par rapport à B1 et B2 s’explique par l’impossibilité de récolter le volume prévu sous un climat très dégradé et par la nature de la récolte additionnelle qui est principalement du BI feuillu (voir figure 20) utilisé dans le scénario considéré (F1) à 82 % en énergie.

L’impact de la **substitution matériau varie entre 8,0 MtCO₂/an et 10,4 MtCO₂/an** selon le scénario et l’horizon de temps. Les variations observées de l’augmentation de la récolte sur l’impact de la substitution matériau sont de l’ordre de 13 % pour le scénario B2 et 20 % pour le scénario B3. Cet impact limité s’explique par l’utilisation prépondérante du BI récolté additionnellement en énergie pour répondre à la demande.

L’impact de la **substitution énergie varie entre 8,5 MtCO₂/an et 14 MtCO₂/an** selon le scénario et l’horizon de temps. L’augmentation de récolte se traduit par une forte augmentation de la substitution énergie (+ 40 % pour le scénario B2 et +50 % pour le scénario B3).

5.3.3 L’UTILISATION DE LA RECOLTE ADDITIONNELLE EN MATERIAUX, LA DIMINUTION DU DECLASSEMENT DU BO, ET LE RECYCLAGE, PERMETTENT D’AMELIORER LE BILAN CARBONE AVAL

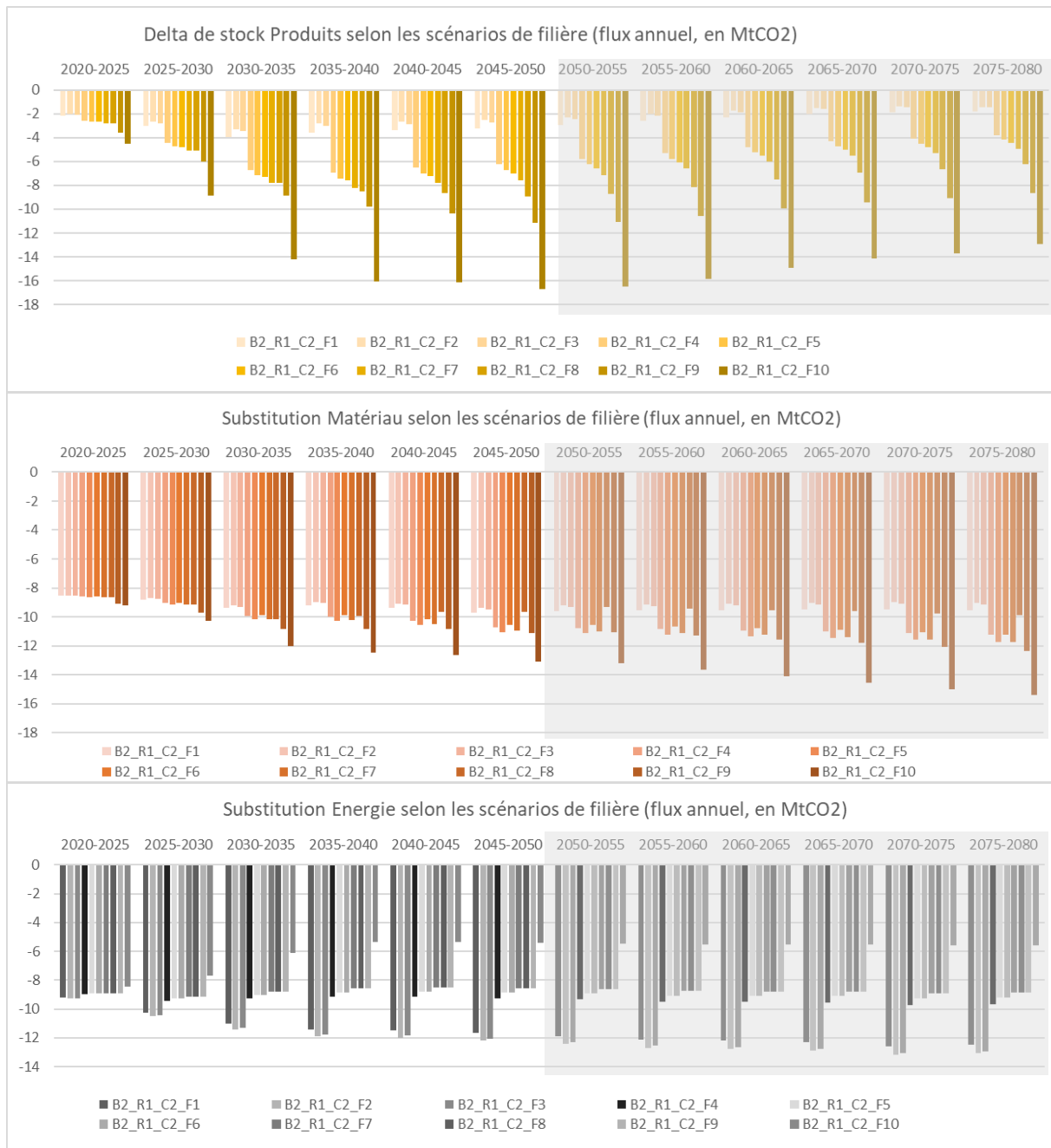
Plusieurs scénarios de filière ont été envisagés pour maximiser le stockage carbone annuel dans les produits bois. Les paramètres choisis sont modifiés de manière cumulée. L’impact sur la substitution a également été évalué. Ces scénarios font l’objet d’une description plus précise dans la section 2.5 et font objet d’une description résumée ci-dessous.

Tableau 16 : Résumé des hypothèses considérées pour le bilan carbone aval des différents scénarios de filière

B2_R1_C2_F1 : récolte additionnelle répondant à la demande (principalement en construction pour le BO et à 70 % pour l’énergie et 30 % pour la construction pour le BIBE)	B2_R1_C2_F6: BI et connexes additionnels en panneaux, BO feuillu et résineux additionnel en construction
B2_R1_C2_F2 : BI et connexes additionnels en énergie	B2_R1_C2_F7 : BI et connexes additionnels en panneaux, BO additionnel en construction, diminution du taux de BO non utilisé en sciage ou déroulage
B2_R1_C2_F3: BI additionnels en énergie	B2_R1_C2_F8 : BI et connexes additionnels en panneaux, BO feuillu et résineux additionnel en construction, diminution du BO feuillu non utilisé en sciage ou déroulage, augmentation du recyclage en France
B2_R1_C2_F4: BI additionnels en panneaux	B2_R1_C2_F9 : BI et connexes additionnels en panneaux, BO feuillu et résineux additionnel en construction, diminution du BO non utilisé en sciage ou déroulage, augmentation du recyclage en France, recyclage domestique des déchets bois/prise en compte du recyclé exporté
B2_R1_C2_F5: BI et connexes additionnels en panneaux	B2_R1_C2_F10 : BI et connexes additionnels en panneaux, BO feuillu et résineux additionnel en construction, diminution du BO non utilisé en sciage ou déroulage, augmentation du recyclage en France, recyclage domestique des déchets bois/prise en compte du recyclé exporté, utilisation en panneaux d’une part plus importante du BI de l’ensemble de la récolte

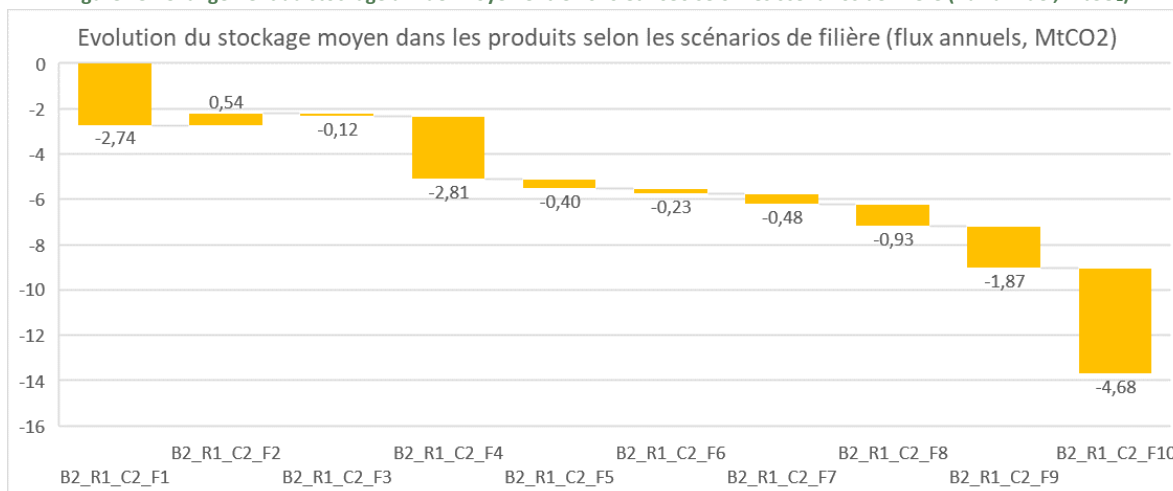
Les résultats sont présentés dans les figures suivantes :

Figure 27: Bilan carbone aval des différents scénarios de filière



Le diagramme en cascade ci-après permet de visualiser l'évolution du stockage annuel en fonction de l'évolution cumulée des paramètres.

Figure 28 : Changement du stockage annuel moyen entre 2020 et 2080 selon les scénarios de filière (flux annuel, MtCO₂)



Il faut noter que les scénarios filière de F1 à F6 ne concernent que la récolte additionnelle par rapport à celle de 2019. Dans les scénarios F7 à F9, la diminution taux de BO non utilisé en sciage ou en déroulage, le recyclage et l'augmentation du recyclage en France/ la prise en compte du recyclé exporté concernent l'ensemble des volumes de la récolte, soit la récolte de base et la récolte additionnelle). Le scénario F10 prévoit à la fois une orientation plus forte de la récolte de BIBE et des connexes vers un usage matériau et un fort taux recyclage.

L'orientation du BI et des connexes de scierie supplémentaires vers l'énergie diminue le stockage dans les produits. Au contraire, l'orientation de la récolte supplémentaire vers les panneaux, la diminution du taux de BO non utilisé en sciage ou en déroulage, l'augmentation du taux de recyclage et l'utilisation de cette matière recyclée en France augmentent de manière significative le stockage. L'augmentation de l'utilisation du BO additionnel en construction augmente le stockage dans une moindre mesure étant donné que la récolte additionnelle de BO est moins importante que la récolte additionnelle de BI et que la récolte additionnelle de BO est déjà très orientée vers la construction (voir section 5.3.1). Si l'on cumule l'ensemble des modifications du schéma de filière (scénario B2_R1_C2_F8), on peut atteindre un stockage annuel de 9 MtCO₂e/an entre 2035 et 2050. Si l'on ajoute le recyclage des déchets bois entièrement en France (ce qui est aussi équivalent à prendre en compte le stockage des déchets bois exportés), le stockage annuel peut dépasser 11 MtCO₂e/an entre 2035 et 2050 (scénario B2_R1_C2_F9). Si l'on considère un scénario où on modifie le devenir de la récolte de base avec une diminution de l'utilisation du bois en énergie, le stockage carbone annuel dans les produits peut atteindre 15 MtCO₂e/an (scénario B2_R1_C2_F10). Il faut souligner qu'il s'agit ici d'un scénario plus ambitieux qui demanderait des évolutions sur de nouveaux usages des panneaux ou le développement de nouvelles filières de recyclage/ réutilisation/ré-emploi.

Il a été fait l'hypothèse que la récolte additionnelle de BO feuillu utilisée en sciages ou en déroulage était gérée comme la récolte additionnelle de BO résineux. Cette hypothèse est forte étant donné qu'actuellement, le BO résineux se retrouve après transformation à 63 % dans un matériau (sciage, panneau ou papier) contre 51 % pour le BO feuillu. Les sciages résineux sont utilisés à 44 % dans des éléments structurels contre 11 % pour les sciages feuillus (voir figure 24).

Les analyses effectuées font augmenter la substitution matériaux jusqu'à +2,8 MtCO₂e/an selon les scénarios (moyenne entre 2020 et 2080) par rapport au scénario de référence B2_R1_C2_F1. La plus forte augmentation de la substitution matériau est associée à l'utilisation du BI et des connexes additionnels exclusivement en panneaux. En effet, le volume de BI additionnel est prépondérant par rapport aux autres compartiments.

Note 1 : Le scénario de déviation du bois d'œuvre additionnel vers les éléments de structure (scénario F6) entraîne une légère baisse de la substitution matériau par rapport au scénario F5. En effet, le volume de BO additionnel est moins important que le volume de BI additionnel. De plus, les coefficients de substitution des éléments du second œuvre sont légèrement supérieurs à celui du CLT qui est le système constructif qui augmente de manière significative entre 2020 et 2035 dans le scénario de filière F1 : il y a donc une légère baisse du coefficient moyen de substitution pour le bois dont l'usage passe de second œuvre à gros œuvre.

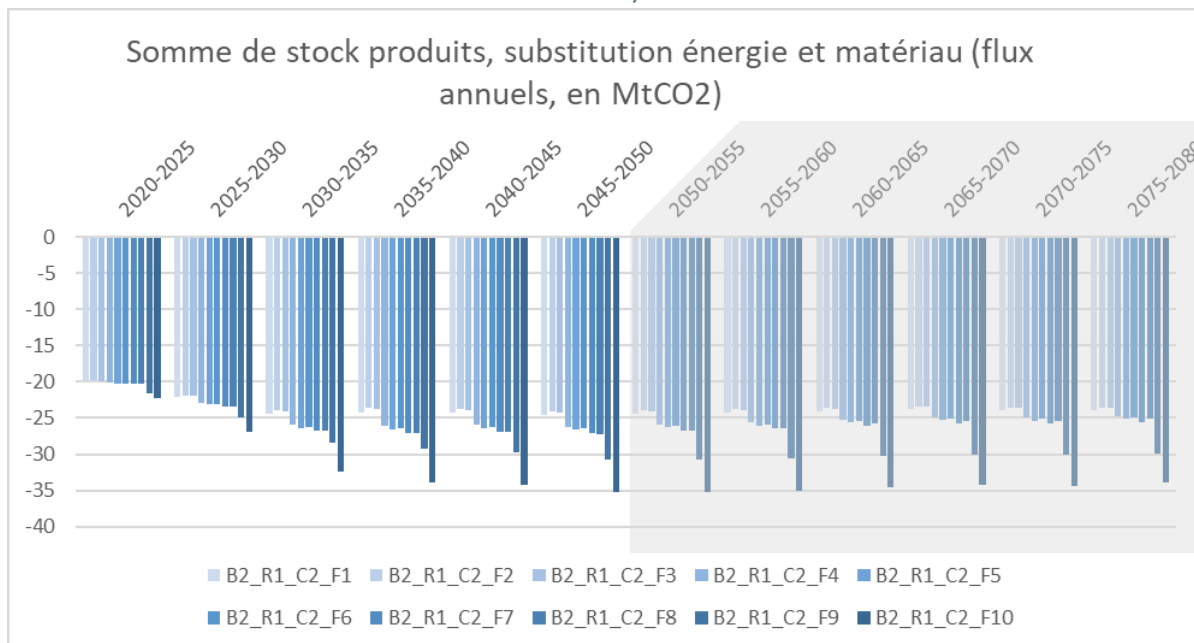
Note 2 : L'augmentation du taux de recyclage (scénario F8) entraîne une diminution de la substitution matériau par rapport au scénario F7. En effet, la valorisation énergétique des produits en fin de vie permet d'économiser plus d'émissions de CO₂ fossile que le recyclage*. Or l'impact de la valorisation des déchets en fin de vie est comptabilisé dans la substitution matériau (« c'est le matériau qui a permis la mise à disposition de cette énergie ») qui est donc diminuée. Cependant cette diminution est compensée par l'augmentation du stockage de carbone dans les produits.

* Il est considéré que le recyclage permet d'éviter l'utilisation de bois vierge ce qui a peu d'impact. La valorisation énergétique par contre permet d'économiser du gaz naturel. L'intérêt du recyclage va être surtout de recréer un panneau et donc de prolonger le stockage du carbone.

On observe une petite augmentation de la substitution énergétique si l'on oriente 100 % du BI et des connexes additionnels vers l'énergie (scénario F2) contre 70 % dans le scénario F1. On peut observer en revanche une diminution de la substitution énergie associée aux scénarios favorisant l'utilisation en matériau, diminution comprise entre 2 MtCO₂ et 3 MtCO₂ par an par rapport au scénario de référence F1. Cette diminution est principalement due à la réorientation vers les panneaux, du BI additionnel (F2), des connexes additionnels (F3) et de la diminution du taux de BO non utilisé en sciages ou en déroulage (F7).

Si l'on additionne les variations de stocks ainsi que les variations de substitution, on peut observer un effet positif de la réorientation de la récolte additionnelle vers des usages matériaux à longue durée de vie et du recyclage comme le montre le graphe ci-dessous :

Figure 29 : Somme du stockage dans les produits et de la substitution énergie et matériau selon les analyses de sensibilité (flux annuel, MtCO₂)



5.3.4 DES COEFFICIENTS DE SUBSTITUTION TOUJOURS FAVORABLES AU BOIS MAIS DECROISSANTS AVEC LA DECARBONATION DES SECTEURS CONCURRENTS ET TRES SENSIBLES A LA SOURCE D'ENERGIE SUBSTITUEE

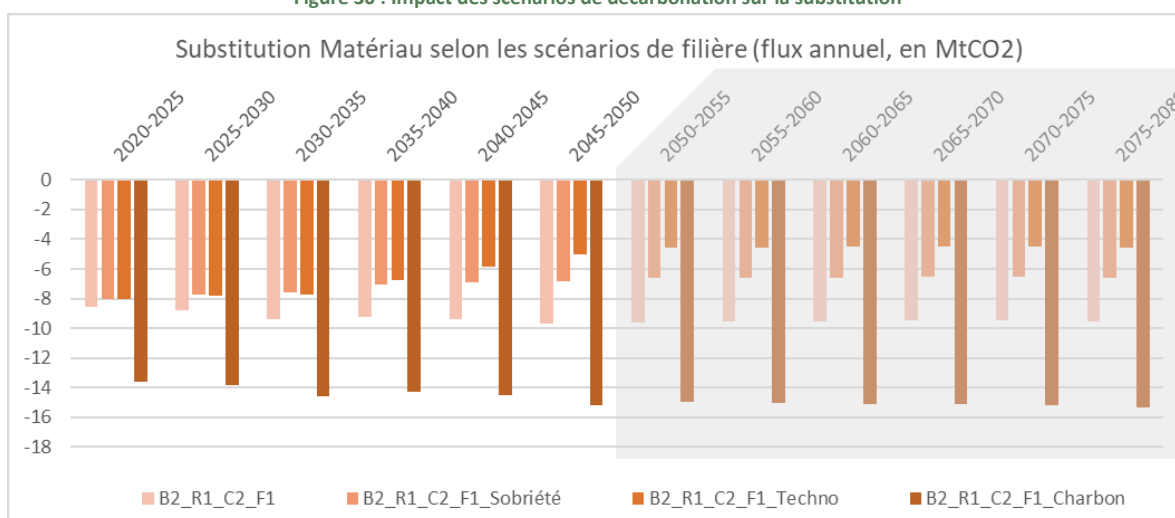
Une analyse de sensibilité a été menée en considérant les deux scénarios de décarbonation développés dans l'étude FBF, Codifab, Copacel et Carbone 4⁴⁵ pour la production des matériaux concurrents au bois comme l'acier et le béton ou pour la production d'électricité. L'analyse de sensibilité a été réalisée sur le scénario B2_R1_C2_F1. Des hypothèses ont été faites concernant la décarbonation de la chaleur en considérant la même courbe de décarbonation que la moyenne de l'industrie. Cette hypothèse est liée au fait qu'il n'existe pas de technologie non émettrice de CO₂ pour la production de chaleur à l'exception de la captation et stockage du carbone, technologie qui pourra également profiter au bois. Les scénarios envisagés sont donc conservateurs par rapport à la filière bois qui pourra se décarboner beaucoup plus notamment par rapport aux transports.

Note : on peut considérer que ces calculs sont conservateurs par rapport aux performances de la filière bois. En effet, le scénario développé par Carbone 4 n'intègre pas une décarbonation du secteur à l'exception de l'électricité utilisée. Notamment, la bioénergie avec prise en compte du captage et du stockage du dioxyde de carbone n'est pas intégrée dans l'étude alors qu'elle l'est dans les scénarios de Carbone 4 pour le ciment notamment.

Une troisième analyse de sensibilité a été réalisée sur le scénario B2_R1_C2_F1 en considérant que l'utilisation de bois en énergie dans les centrales biomasse remplace du charbon au lieu du gaz naturel. En effet, dans le document ⁴⁶, il est indiqué que certaines des centrales biomasse remplacent du charbon.

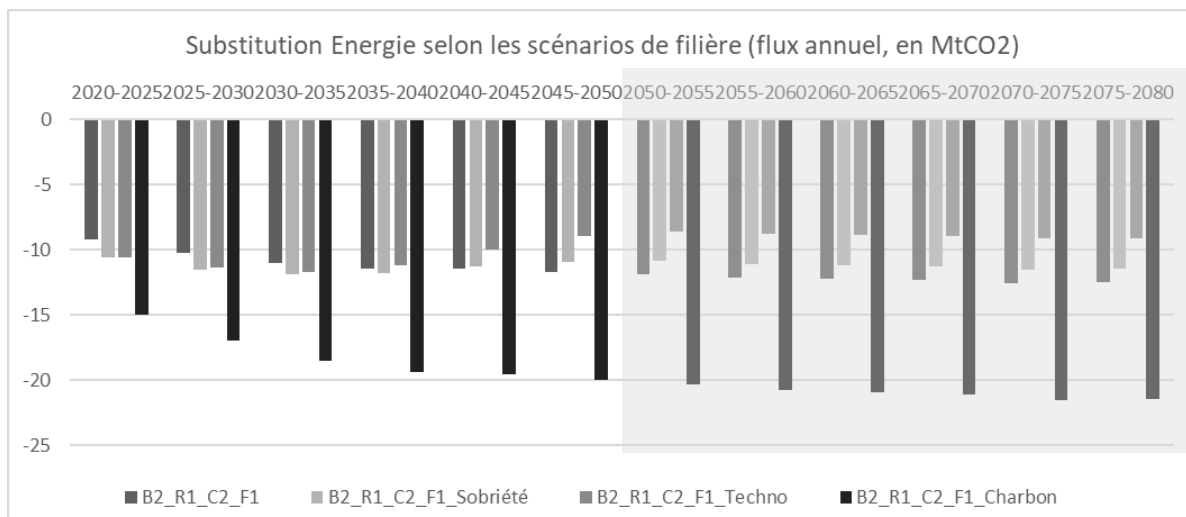
Les résultats sont présentés dans les deux figures suivantes :

Figure 30 : Impact des scénarios de décarbonation sur la substitution



⁴⁵ FBF, Copacel, Codifab & Carbone 4, 2024. Filière forêt-bois : Scénario de convergence du bouclage bois-biomasse à l'horizon 2050. <https://franceboisforet.fr/2024/02/12/communique-de-presse-2030-2050-quel-scenario-carbone-pour-la-filiere-foret-bois/>

⁴⁶ Ministère de l'Economie, 2021. France Relance - Décarbonation de l'industrie. https://www.economie.gouv.fr/files/files/directions_services/plan-de-relance/20211115_DP_decarbonation_industrie.pdf



Appliqués à la combinaison B2_R1_C2_F1, les scénarios de décarbonation entraînent une diminution moyenne de 0,5 MtCO₂ (scénario Sobriété) à 2,0 MtCO₂ (scénario Protechno) pour la substitution énergie, et de 2,5 MtCO₂ (scénario Sobriété) à 3,9 MtCO₂ (scénario Protechno). On peut souligner que l'utilisation de produits bois permet d'économiser des émissions de CO₂ fossile même en considérant des scénarios de décarbonation. Si l'on considère que le bois (déchets et bois issu de forêts ou de connexes) remplace du charbon, la substitution matériau est augmentée de 60 % via la valorisation énergétique des déchets en fin de vie et de 200 % pour la substitution énergie.

5.4 BILAN CARBONE INTEGRE DU SECTEUR FORET-BOIS

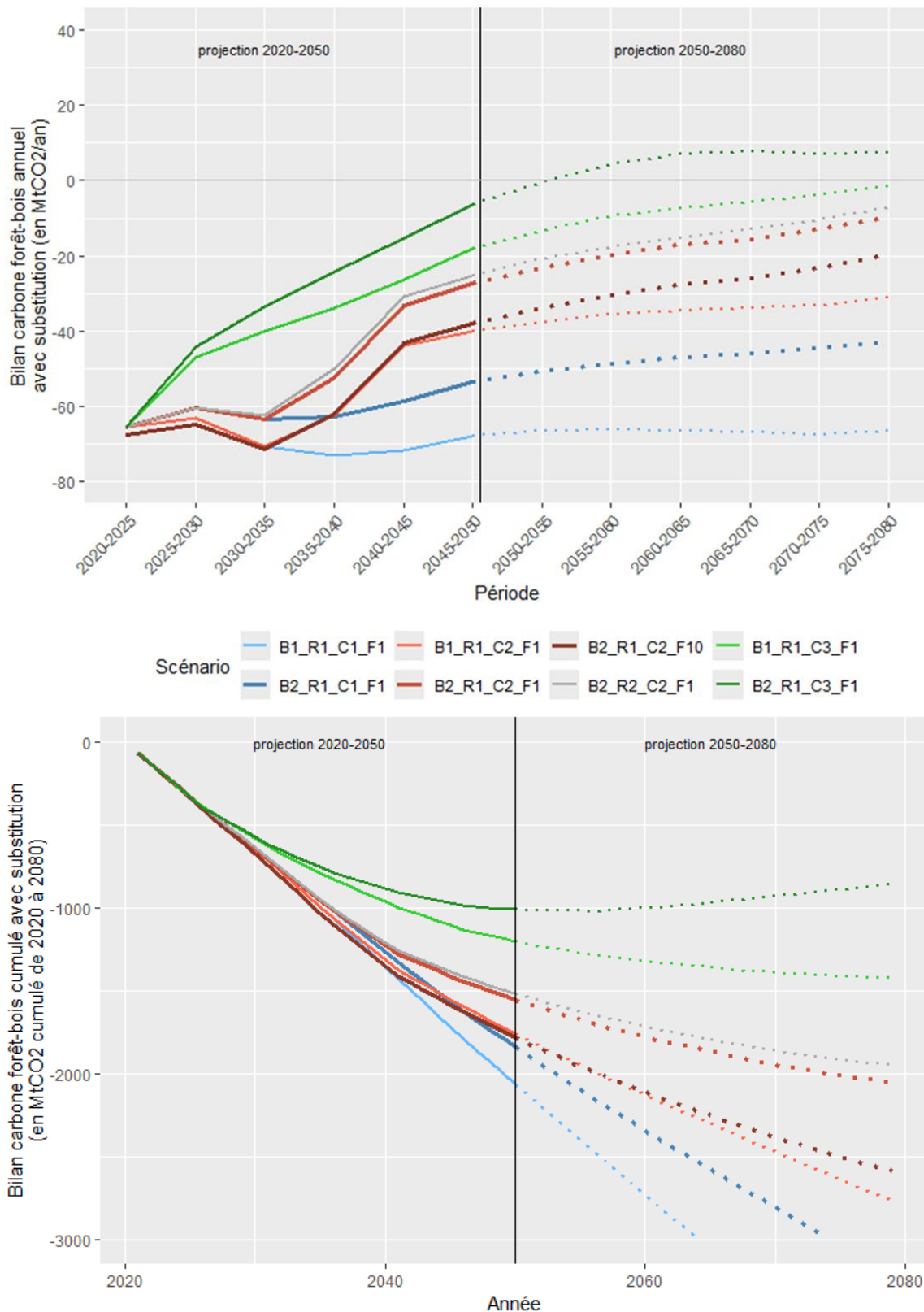
5.4.1 LES BILANS TOTAUX AU NIVEAU FORET-BOIS DEMEURENT ENCORE POSITIFS A COURT TERME

A l'horizon 2050, les bilans intégrés entre l'amont forestier et la filière aval des différents scénarios restent tous dans le sens d'une absorption de carbone et soulignent ainsi la particularité et le rôle positif du secteur forêt-bois dans l'atténuation du changement climatique. Si cette contribution de l'ensemble du secteur forêt-bois a diminué ces dernières années avec la chute du puits forestier, les absorptions annuelles de CO₂ et l'effet de substitution par l'usage du bois représentent toujours une part importante des leviers d'atténuation, avec des valeurs, au point de départ des projections, comprises entre -45 et -50 MtCO₂e/an pour le stockage (soit l'équivalent du tiers des émissions du secteur des transports) et autour de -17 MtCO₂e/an pour la substitution (cf. figure 31 et figure 32). En 2050, la gamme de variation des bilans totaux selon les scénarios intégrés entre amont et aval s'échelonnent de -5 à -70 MtCO₂e/an en cumulant stockage et substitution (cf. figure 31 ci-dessous et annexe de la tâche 9). Globalement, les scénarios simulés tendent vers un amoindrissement plus ou moins marqué de la contribution positive du secteur à la lutte contre le réchauffement climatique. Cependant, ce résultat de flux annuel de CO₂ est à mettre en regard avec les stocks très importants de carbone déjà contenus dans les forêts (cf. paragraphe 5.1) et dans les produits bois (cf. paragraphe 5.1).

La substitution représente une composante particulière du bilan carbone du secteur forêt-bois. En effet, si le stockage dans l'écosystème et les produits bois constituent bien des absorptions directes et concrètes de carbone, pouvant être comptabilisées comme un flux de carbone net entrant annuellement dans le système, la substitution ne peut s'entendre qu'en comparaison de ce qui se passe dans les autres secteurs. Rigoureusement, il est nécessaire d'analyser la substitution en différentiel d'un scénario de référence dans lequel le bois occupe déjà une certaine place, qu'il est cependant difficile de définir ici sachant que l'étude vise à projeter différentes trajectoires sans parti pris. Les graphiques ci-dessous (cf. figure 31) additionnent ces deux types de composantes,

il convient de les interpréter en prenant en compte cette différence entre stockage et substitution dans la nature des tonnes de CO₂ considérées.

Figure 31 : Evolution des bilans carbone totaux annuels (haut) et cumulés (bas) de la filière forêt-bois



NB : Sont considérés le stockage dans la biomasse vivante, dans le bois mort et dans les produits bois, la substitution énergie et matériaux, mais pas de prise en compte des sols. Les résultats sont fournis en projection pour 8 scénarios de l'étude (en MtCO₂e/an ou en MtCO₂e cumulés à partir de 2020).

Aussi, afin de faciliter certaines analyses, les graphiques ont été reproduits ci-dessous sans prendre en compte la substitution (cf. figure 32) et en calculant le différentiel par rapport à un scénario de référence (cf. figure 33). Cependant, les bilans sans substitution de la figure 32 sous-estiment la contribution totale de la filière, et il n'est pas possible de les utiliser pour comparer et classer les scénarios entre-eux. Ces graphiques sans substitution permettent en revanche d'analyser le bilan carbone forêt-bois au sens strict des absorptions du secteur, tel qu'il est calculé par ailleurs dans les méthodes de comptabilité carbone officielles, qui tiennent compte de l'effet substitution indirectement par le calcul des émissions des autres secteurs économiques. Pour permettre une comparaison entre scénarios plus exacte de la contribution de la filière par le double effet de stockage et de substitution, les graphiques de la figure 33 présentent le différentiel des résultats avec le scénario B2_R1_C2_F1, qui constitue un scénario largement étudié dans les analyses intégrant amont-aval de cette étude. Cependant, cela ne présume pas que ce scénario constitue une référence dans l'absolu, ni qu'il corresponde à un scénario tendanciel ou *business as usual*, que ce soit d'un point de vue de la gestion et de la récolte, ou de celui de l'évolution des effets du climat. Cette analyse est un outil technique pour comparer les résultats et ne remet pas en question la philosophie de l'étude visant à explorer différentes trajectoires variées et possibles de gestion et d'effets du climat.

Figure 32 : Bilans carbone totaux annuels et cumulés de la filière forêt-bois, sans prise en compte de la substitution, ni du stockage dans les sols

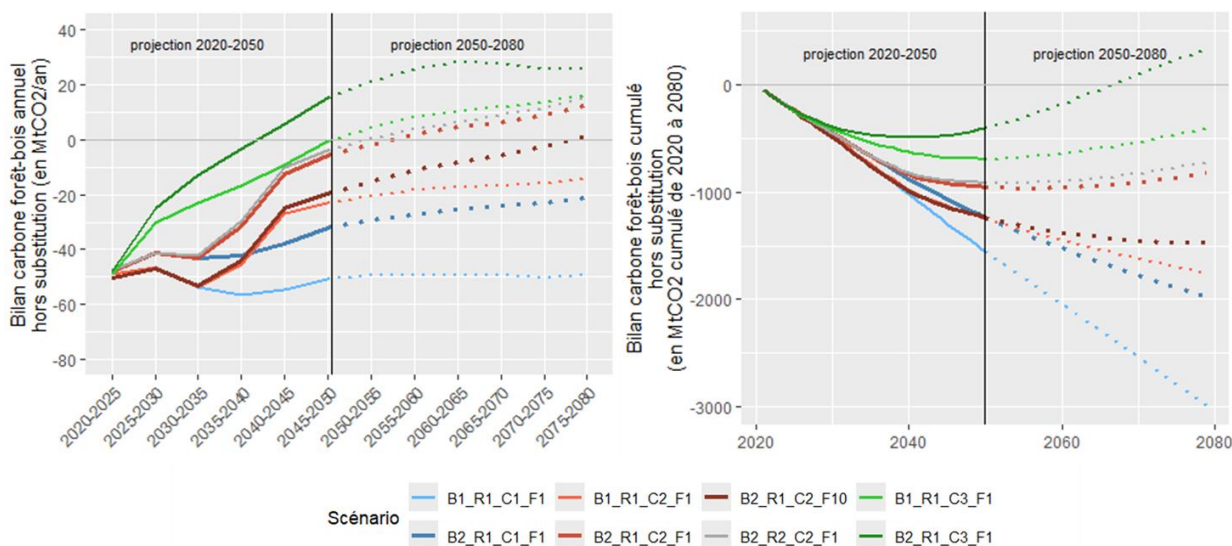
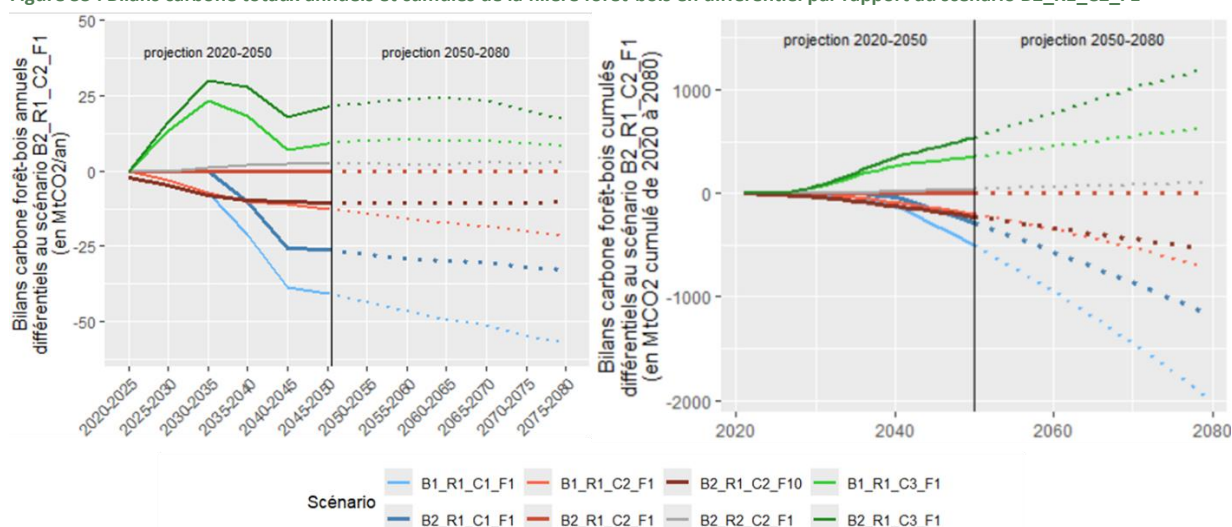


Figure 33 : Bilans carbone totaux annuels et cumulés de la filière forêt-bois en différentiel par rapport au scénario B2_R1_C2_F1

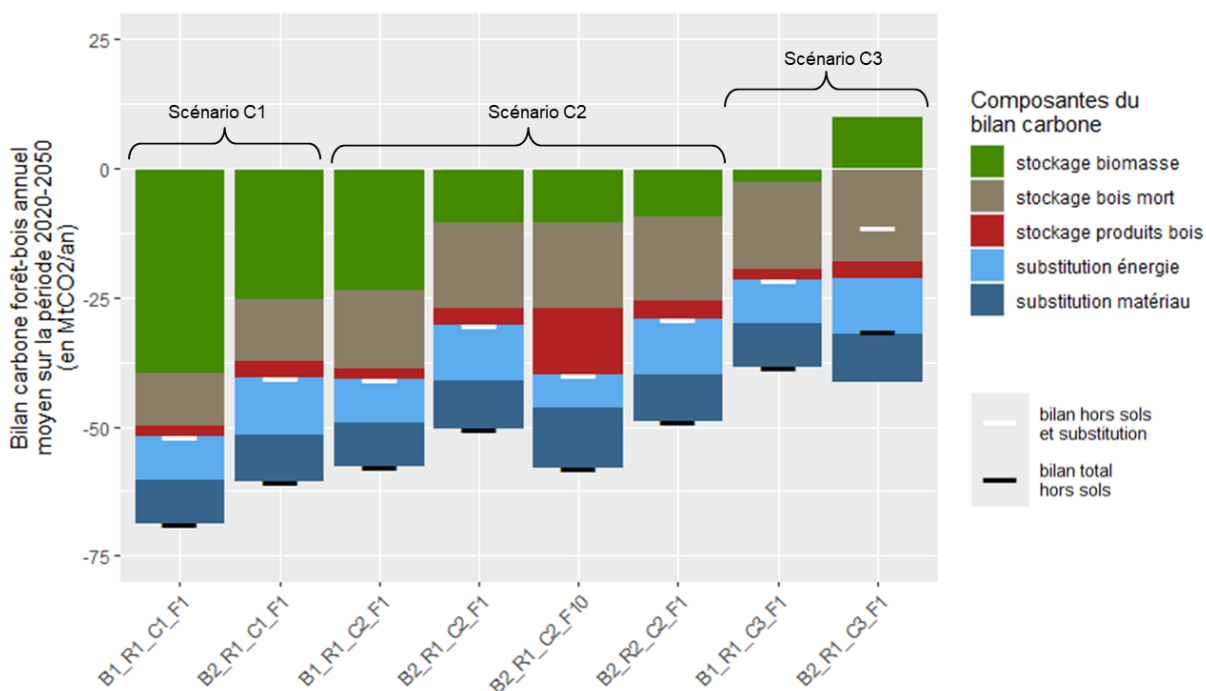


Les **principales divergences entre les scénarios représentés dans les figures ci-dessus concernent les effets du climat**. L'impact de ces trois types de scénarios à l'horizon 2050 est majeur, avec une différence cumulée plus forte du C3, qui dérive par rapport au C1 et au C2 dès 2025 dans ses hypothèses (alors que c'est à partir de 2035 que les hypothèses du C2 ne suivent plus la trajectoire de celle du C1).

En 2050, plus le scénario d'effets du climat est pessimiste, moins les différences entre scénarios de gestion sont fortes (cf. l'écart moyen de 7 MtCO₂/an entre les scénarios B1_C3 et B2_C3 versus l'écart moyen de 8 MtCO₂/an entre les scénarios B1_C1 et B2_C1 dans la figure 34 ci-dessus). En effet, lorsque le stockage en forêt diminue du fait des conditions climatiques, il devient d'autant plus intéressant d'un point de vue carbone de stocker dans les produits bois et de substituer des émissions avec ce type de matériau.

Par ailleurs, il est également notable que, **pour un même scénario climatique, l'impact d'une allocation de la récolte dans des usages plus favorables au stockage de carbone et d'un meilleur recyclage des produits bois est du même ordre de grandeur au niveau du CO₂ que l'augmentation de la récolte elle-même** pour les scénarios intermédiaires de récolte et d'effet du climat (cf. différence entre scénarios B2_R1_C2_F1 et B2_R1_C2_F10 versus différence entre scénarios B1_R1_C2_F1 et B2_R1_C2_F1 dans le graphique ci-dessus). Cela souligne l'importance des choix de valorisation des bois effectués au niveau de la filière bois pour les enjeux carbone associés à une augmentation de la récolte. Cette optimisation de la filière est une solution toujours gagnante.

Figure 34 : Répartition du bilan carbone annuel moyen sur la période 2020-2050 de la filière forêt-bois par compartiment



NB : Sont considérés le stockage dans la biomasse vivante, dans le bois mort et dans les produits bois, la substitution énergie et matériaux, mais pas de prise en compte des sols. Les résultats sont fournis en projection pour 8 scénarios de l'étude (en MtCO₂e/an).

La figure 34 présente le bilan carbone complet des différents scénarios qui se répartit entre stockage en forêt, stockage dans les produits et émissions évitées par l'usage de produits bois :

- En climat C1, le bilan carbone annuel est encore dominé par le puits forestier. Ainsi, le bilan carbone du scénario B1_R1_C1_F1 repose à 75 % sur le stockage en forêt. Le bilan du scénario B2_R1_C1_F1 est composé pour 66 % du stockage en forêt (2/3) et pour 1/3 sur la filière aval, essentiellement sur la substitution matériau et surtout énergie. Le stockage dans les produits est une composante mineure du bilan.

- En climat C2, le puits forestier se situe entre 50 % (ensemble des scénarios B2) et 66 % (scénario B1) du bilan carbone total selon le niveau de récolte. Le stockage dans les produits représente entre 3 % (B1_R1_C2_F1) du bilan global et 22 % (B2_R1_C2_F10).
 - Le scénario B2_R1_C2_F10 se distingue par une orientation forte de la récolte vers les filières matériaux ainsi qu'une augmentation du recyclage domestique.
 - L'influence du plan de renouvellement se traduit par une légère augmentation du puits forestier en 2050 (cf. différence entre B2_R1_C2_F1 et B2_R2_C2_F1, dont les objectifs sont plus ou moins ambitieux). Mais les effets positifs du plan, tant sur le bilan amont qu'aval de la filière ne sont visibles qu'après 2050 (cf. paragraphe 5.4.2).
- En climat C3, en moyenne le puits forestier devient de plus en plus faible, s'approchant d'une valeur nulle, surtout pour le scénario B2. Si l'on comptabilise le stockage dans les produits et la substitution, le scénario B1 se rapproche du scénario B2, tout en restant plus favorable (cf. total représenté par la barre noire en C3 dans la figure 34).

Globalement, **la part de la contribution de la filière bois dans le bilan total augmente en proportion lorsque le stockage en forêt diminue**, notamment à cause des effets du climat.

Pour l'ensemble des scénarios, le stockage dans le bois mort en forêt est relativement important dans le bilan moyen sur la période 2020-2050, mais cache un phénomène peu durable dans le temps en lien avec la décomposition du bois mort et des oscillations importantes suivant les périodes de crises ou d'accalmies de la mortalité (cf. paragraphe 5.2.2). Ce stockage, regroupant à la fois une mortalité "normale" et la mortalité de crise, est naturellement légèrement plus fort pour des scénarios d'effets du climat plus pessimistes qui accroissent la surmortalité des arbres (cf. figure 34). Le scénario de gestion n'influence finalement que peu le stockage de carbone dans le bois mort, car une partie de ce bois mort provient certes de la mortalité restant en forêt, diminuant avec la dynamisation de la gestion, mais également des pertes d'exploitation, augmentant avec la hausse de la récolte.

Du point de vue des répercussions des choix de gestion, le puits forestier créé par le plan de reboisement est peu visible à l'horizon de temps 2050 de l'étude mais avec un effet positif à plus long terme (cf. différence entre scénarios R1 et R2 dans la figure 31 et la figure 34). Le stockage en forêt est plus dynamique pour le scénario B1 que pour le scénario B2, notamment par le stockage dans la biomasse vivante, ce qui explique la meilleure performance moyenne de ce scénario B1 par rapport au B2, notamment dans les scénarios d'effets du climat plus optimistes. En effet, dans la plupart des scénarios étudiés, la hausse des prélèvements en forêt n'est que partiellement compensée d'un point de vue strictement carbone par le stockage dans les produits bois et les émissions évitées par l'usage dans de produits bois. Cependant, un des leviers majeur et toujours favorable au bilan est l'usage de cette augmentation de la récolte dans des produits à plus longue durée de vie (scénario F10), qui renforce de façon conséquente la contribution de la filière.

Par ailleurs, dans tous les scénarios, une part de la récolte concerne des arbres morts ou dépérissants (entre 5 et 10 % de la récolte suivant les scénarios d'effets du climat pour les scénarios B1 et B2). Compte-tenu des volumes déjà concernés et qui pourraient être plus conséquents à l'avenir, il apparaît que la filière bois joue également un rôle important dans le bilan total en stockant plus longuement le carbone de ces arbres. En effet, la différence de durée de vie entre le bois mort et les produits en matériaux bois, surtout avec du recyclage, est positive, et si ces bois de crise de moins bonne qualité font souvent l'objet d'usages moins favorables, cela accroît l'enjeu de mieux les valoriser.

5.4.2 LES EFFETS DES CHOIX ACTUELS SUR LE BILAN CARBONE NE SONT VISIBLES QU'À LONG TERME

Les résultats post-2050 sont d'autant plus empreints d'incertitudes. En effet, au-delà de cet horizon de 2050 certains paramètres deviennent très fragiles et les hypothèses de certains scénarios ne sont plus valides (notamment pour les scénarios d'effets du climat, mais également pour certains scénarios de gestion dont les objectifs ne sont pas atteignables au-delà de 2050). Les tendances sur le long terme sont donc fournies à titre illustratif, en particulier pour évaluer des impacts de choix de gestion effectués actuellement, tels que le plan de reboisement. En effet, du fait du temps long de l'entrée en production des forêts, les actions entreprises aujourd'hui n'auront des résultats que dans plusieurs décennies. A l'horizon 2080, le puits reste actif pour les climats C1 et C2 mais le secteur devient source pour le climat C3 quel que soit le niveau de récolte (cf. figure 31). En bilan cumulé (cf. figure 31), cela se traduit par une nette différenciation entre les courbes des scénarios d'effets du climat C1 et C2 dont la tendance montre une amélioration du bilan alors que les courbes du scénario C3 illustrent sa dégradation.

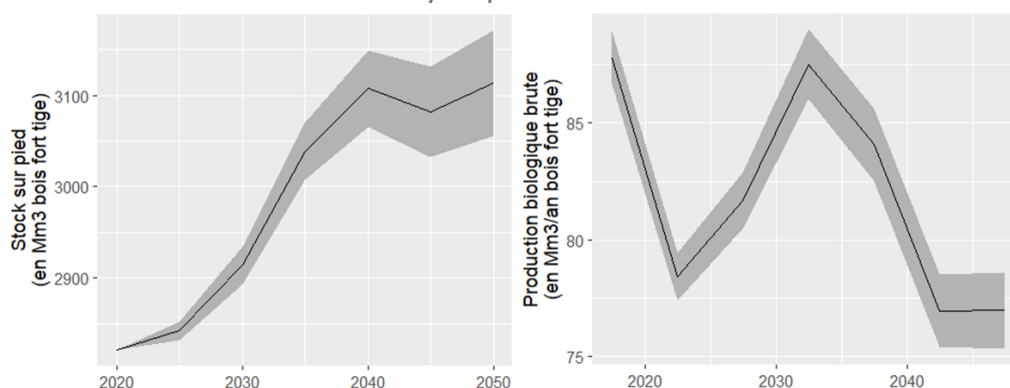
Les effets du plan de reboisement sont positifs sur le bilan carbone mais restent faibles et ne commencent à se refléter dans les résultats qu'à partir de 2045 environ. Ces effets concernent les différentes composantes du bilan carbone forêt-bois. Sur la période 2035-2080, c'est-à-dire à partir du moment où le plan de reboisement est complètement mis en place, le stockage de carbone en forêt est plus favorable dans le scénario de reboisement optimiste que dans le pessimiste (15,6 MtCO₂e/an séquestrées dans la biomasse vivante sur 2035-2080 dans le scénario B1_R1_C2 contre 12,4 MtCO₂e/an dans le scénario B1_R2_C2). Cette augmentation du puits est à la fois liée au renouvellement de peuplements dépérissants donc peu productifs, mais également due au fait que les peuplements plantés permettent un apport de bois dans la filière rendant moins nécessaire d'intensifier les coupes dans les autres peuplements pour atteindre l'objectif national de récolte.

Par ailleurs, la mise en œuvre du plan de reboisement engendre une légère augmentation de la part du bois d'œuvre dans les disponibilités en bois à partir de 2050 (49 % dans le scénario B1_R1_C2 sur la période 2050-2080 contre 48 % pour le scénario B1_R2_C2). Cette variation du BO reste faible à l'échelle nationale puisque le plan de reboisement ne concerne finalement que quelques pourcents de la surface forestière et ne vise pas seulement à produire du bois d'œuvre (diversification des essences, essences résistantes...). Compte-tenu de la jeunesse des plantations sur l'horizon temporel étudié, la part de BO est également limitée par d'éventuels dégâts (succès de reprise des plants) et par une proportion encore grande des coupes d'éclaircies sur des jeunes peuplements. Sa productivité pourrait également être amoindrie par des échecs de plantations, par le changement climatique... L'apport supplémentaire de BO dans les disponibilités permis par le plan de reboisement engendre cependant déjà une petite augmentation du stockage dans les produits bois et de la substitution en bois matériau, du fait de la possibilité de valoriser ces bois en produits à longue durée de vie.

5.5 LES INCERTITUDES ASSOCIEES AU CALCUL DU BILAN CARBONE

Compte-tenu du nombre important de paramètres et d'hypothèses mobilisés dans les modélisations des bilans carbone, et malgré l'application des connaissances les plus à jour sur ces différents paramètres, les résultats présentés dans ce chapitre sont empreints d'un certain nombre d'incertitudes. L'impact de ces incertitudes est le plus souvent cumulatif sur l'horizon temporel et d'autant plus sensible sur les résultats combinant plusieurs composantes, tels que les résultats de flux (cf. figure 35).

Figure 35 : Impact sur les projections du scénario B1_R1_C2 de l'incertitude liée à l'échantillonnage statistique autour des paramètres de dynamiques naturelles



NB : Le calcul des incertitudes présenté ici se base sur la méthode développée par Audinot et al., 2021⁴⁷

Différentes sources d'incertitudes sur les paramètres de modélisation, d'ampleur plus ou moins forte, peuvent ici être citées :

- liées à **l'échantillonnage de l'IFN** et inhérentes à toute méthode statistique. Elles se répercutent sur l'estimation des paramètres de dynamiques naturelles (cf. figure 35) et de la ressource initiale ;
- dans **l'estimation des modulateurs des scénarios d'effets du climat** dont l'impact peut être majeur sur les résultats ;
- sur **la part et l'évolution des produits sanitaires** reposant sur des sources de données aux définitions variables (cf. analyse de sensibilité dédiée chapitre 4.3) ;
- **des facteurs de conversion en volume aérien total et en biomasse** pour lesquels des travaux de recherche récents permettront une révision prochaine (cf. projets XyloDensMap et Emerge)
- sur **l'estimation des pertes d'exploitation** potentiellement très impactante sur les volumes de récolte, d'autant plus en cas de crise sanitaire (cf. analyse de sensibilité dédiée au chapitre 4.3) et qui nécessiterait des travaux d'évaluation plus poussés ;
- de **la demi-vie du bois mort en forêt**, dont la vitesse de décomposition est complexe à mesurer et dépendante de nombreux facteurs ;
- du **stockage de carbone dans les sols forestiers à l'avenir**, pris en compte uniquement qualitativement dans la présente étude (cf. chapitre 5.2.3), dont l'amélioration de l'estimation repose sur des projets en cours (cf. remesures du RMQS, travaux du PEPR FairCarboN) ;
- **sur l'estimation de la qualité potentielle** des arbres et ses conséquences sur la répartition des disponibilités par type d'usage dans la filière ;
- sur **la part de l'autoconsommation de bois énergie** dans les flux de bois actuels et futurs, dont l'estimation repose sur des indicateurs moins fiables que les autres flux dans la filière ;
- dans **la prise en compte des imports et des exports** ;
- de **la durée de vie des produits bois**, dépendante notamment de l'utilisation en fin de vie des produits et d'évolutions dans les pratiques de consommation, une analyse comparative avec l'étude réalisée par Carbone 4 permet d'apprécier la mesure de ces incertitudes et des travaux visant à améliorer de ces coefficients sont amorcés (cf. projet BACCFIRE) ;
- dans la **valeur actuelle et l'évolution des coefficients de substitution** dont l'estimation repose sur des ACV complexes et des hypothèses sur les secteurs concurrents pouvant varier avec la décarbonation de l'économie (cf. analyse de sensibilité dédiée au chapitre 5.3.4 et prévues dans le projet BACCFIRE).

Il est donc nécessaire d'interpréter ces projections en regard de ces différentes incertitudes, pouvant facilement induire une sensibilité des résultats de l'ordre de plusieurs millions de tonnes de carbone par an.

⁴⁷ Audinot et al., 2021. Modeling and propagating inventory-based sampling uncertainty in the large-scale forest demographic model "MARGOT". <https://hal.science/hal-03903795>

6 CONCLUSIONS GÉNÉRALES

6.1 UNE COMPLÉMENTARITÉ AMONT-AVAL ESSENTIELLE POUR MAXIMISER LE BILAN CARBONE FORESTIER

La baisse récente observée du puits de carbone des forêts françaises devrait se poursuivre sur les prochaines décennies dans la majorité des scénarios. Si le vieillissement des forêts pourrait être un facteur d'essoufflement du puits, cette tendance à la baisse est, en France, principalement due à l'aggravation des conditions climatiques, affectant deux paramètres clés du stockage de carbone en forêt : la croissance et la mortalité des arbres. Malgré cette dégradation du climat et la survenue de crises, **la forêt et le bois restent des alliés dans la lutte contre l'augmentation de l'effet de serre** (cf. tribune dans *Le Monde*⁴⁸). En effet, **la contribution intégrée du secteur forêt-bois à l'atténuation du changement climatique demeure positive à l'horizon 2050 dans la plupart des cas simulés**. Elle prend la forme de trois leviers interdépendants : la séquestration de carbone dans l'écosystème forestier, le stockage dans les produits bois, et l'effet substitution permettant d'éviter des émissions de CO₂ dans d'autres secteurs. La part relative des leviers de l'amont et de l'aval varie sensiblement suivant les scénarios de gestion simulés, et les projections peuvent dessiner une inversion du bilan carbone de puits à source selon les périodes pour certains scénarios. Mais l'ensemble du secteur forêt-bois garde un effet positif sur le bilan carbone, y compris dans des scénarios d'augmentation de la récolte (jusqu'au scénario B2_C2). La performance carbone globale est cependant généralement meilleure dans les scénarios favorisant le stockage en forêt à l'horizon 2050, échéance cependant proche par rapport au temps long des forêts.

Pour autant les écosystèmes forestiers ne sauraient constituer un puits de carbone sans fond, pour des raisons de limitations physiques et biologiques. En outre, même en considérant l'effet tampon procuré à court terme par une hausse du bois mort, le **stockage de carbone en forêt est sensible aux crises** risquant d'affecter les arbres à l'avenir. La sévérité, la temporalité et les types de ces crises futures sont inconnues, mais celles simulées dans les scénarios d'effets du climat illustrent les impacts qu'elles engendreraient sur le bilan carbone forestier. Ces impacts sont par ailleurs d'autant plus forts que le capital sur pied exposé aux risques est important, par exemple lors de crises ultérieures dans les scénarios de moindre récolte. En outre, l'éventuelle survenue d'aléas encore plus extrêmes ou cumulés entre eux (tempêtes, méga-feux, ravageurs, etc.), non scénarisés dans la présente étude et non exclusivement liés au changement climatique, induirait des conséquences encore plus lourdes sur le stockage de carbone (cf. étude INRAE IGN 2017⁴⁹). Ces différentes menaces sur les forêts françaises incitent à développer une culture du risque et à **renforcer la vitalité des filières, la protection des forêts face aux aléas et l'adaptation du secteur forestier**.

La mise en place de réponses adaptées aux changements globaux reste complexe face à la diversité des situations rencontrées et au peu de recul dont disposent à ce jour les professionnels. Bien que les incertitudes demeurent importantes, des solutions toujours gagnantes existent. Elles passent par une **plus forte agilité et réactivité face aux crises, tant au niveau de la gestion forestière que de la filière bois**, avec l'enjeu de mieux prévenir les risques (ex : équipements DFCI des massifs) et de mieux mobiliser, valoriser et renouveler les peuplements dépérissants qui entraînent par exemple des récoltes subies de bois. Mais il est également nécessaire de prendre en compte **le temps long des forêts par des actions d'anticipation** visant à limiter les situations d'impasse et lisser les crises en adaptant les peuplements forestiers, les pratiques sylvicoles et les usages dans la filière (cf. paragraphe 6.3). Dans ce cadre, l'objectif de production de bois de qualité pour des usages plus favorables au stockage durable de carbone et à la substitution se prépare dès aujourd'hui pour les peuplements de demain.

⁴⁸ Colin, et al., 2024. Climat : La forêt ne peut pas être un puits infini de carbone.

https://www.lemonde.fr/idees/article/2024/01/20/climat-la-foret-ne-peut-pas-etre-un-puits-infini-de-carbone_6211947_3232.html

⁴⁹ Roux et al., 2017. Quel rôle pour les forêts et la filière forêt-bois française dans l'atténuation du changement climatique ? <https://www.inrae.fr/actualites/quel-role-forets-filiere-foret-bois-francaises-lattenuation-du-changement-climatique>

La complémentarité de l'amont et de l'aval du secteur, illustrée dans la gestion des crises, s'exprime également dans des scénarios d'effets du climat défavorables, dans lesquels la contribution de la filière au bilan total devient majeure et peut permettre de compenser partiellement de fortes baisses du stockage de carbone dans l'écosystème (cf. paragraphe 5.4.1). Le bilan carbone total est quantitativement moins favorable dans les scénarios ciblant une récolte plus forte, mais la part jouée par les usages du bois y est plus importante, et **plus le climat se dégrade, plus le rôle de la filière devient important** dans le maintien d'un bilan carbone favorable. Dans les scénarios où le stockage en forêt s'approche de zéro de façon volontaire (scénario B3) ou subie (scénario C3), ce sont les usages du bois qui permettent au secteur de continuer à stocker du carbone et atténuer les émissions de gaz à effet de serre, notamment par effet substitution. Par ailleurs, la **hausse attendue de la demande en bois**, notamment celle du secteur de la construction challengeant l'offre en bois d'œuvre résineux de l'amont forestier, nécessiterait une augmentation de la récolte et une amélioration des capacités de transformation en France afin d'éviter un recours massif aux importations pesant sur l'empreinte carbone du pays.

L'évolution des usages des bois et des outils de transformation en France représente un levier majeur pour maximiser le bilan carbone du secteur (cf. différences entre scénarios F1 et F10). Ce constat renforce le besoin **d'investir dans les usages à longue durée de vie du bois** et dans les outils de transformation en France. Cela passe par le développement de la compétitivité de la filière bois, qui permet par ailleurs de limiter les importations, et par l'innovation dans **la valorisation en matériau des bois feuillus ou des bois de crise**, qui vont être amenés à croître fortement, avec des produits qui ne sont pas limités par la diversité d'espèces et les types de bois disponibles en forêt. Cet enjeu représente cependant un défi, avec des besoins de réponses à court terme, alors que le développement et les investissements permettant la récolte et la transformation de ces bois se programment sur le moyen terme. **L'amélioration du recyclage des produits en fin de vie, de la réutilisation et du réemploi**, ainsi qu'une plus forte valorisation des co-produits, en panneaux ou isolants par exemple, pourraient également concourir à une amélioration du bilan carbone de la filière. La réutilisation et le réemploi du bois en fin de vie permettrait en effet de fournir du bois matériau en optimisant la récolte. Des recherches pour développer l'usage des bois de récupération seront nécessaires (qualification des bois de récupération, tri, collage etc.). Si l'usage en énergie du bois est moins favorable au niveau du carbone que celui des matériaux bois (pas de stockage dans les produits et plus faible substitution), il fait l'objet d'une demande grandissante à l'avenir. Le **respect de la cascade des usages** limitant la valorisation énergétique aux bois ne pouvant être transformés en matériau comme une partie des bois de faible qualité, des produits en fin de vie ou des connexes, et **l'amélioration des performances des équipements de chauffage**, notamment individuels à foyers ouverts peu efficaces, restent des leviers importants dans ce cadre.

Au-delà du stockage et de la substitution carbone, le secteur forêt-bois constitue dès aujourd'hui et restera encore à l'avenir un très fort réservoir de carbone, notamment dans les arbres en forêt et dans une moindre mesure dans les produits bois, mais aussi dans les sols forestiers qui constituent un pool majeur de carbone. Dans certains scénarios, l'évolution du contexte climatique nécessiterait de passer d'une logique d'augmentation ou de maintien du stockage de carbone à celle **d'une optimisation des stocks et d'une limitation du déstockage lorsque cela est possible**, auquel cas il deviendrait nécessaire de piloter le système forêt-bois selon l'évolution des stocks et non plus l'optimisation de certains flux. D'autant plus qu'avec les crises, le bilan carbone, résultant des différents flux, devient indicateur difficilement pilotable alors que les stocks de carbone sont des éléments plus tangibles. Dans tous les cas, un équilibre est à trouver entre les grandes composantes du bilan carbone, notamment dans le compromis entre une récolte de bois, visant à satisfaire des besoins sectoriels ainsi qu'à adapter et améliorer les peuplements à long terme, et une amélioration de la pompe à carbone des écosystèmes forestiers au moins à court terme. Cette question sollicite des **choix de société et des arbitrages politiques**, conduits notamment dans le cadre de la planification écologique et des travaux de la SNBC. Quoiqu'il en soit il paraît important de considérer l'intérêt de la complémentarité et de la diversité de stratégies, qui pourraient aussi se **décliner différenciellement sur le territoire aux différentes échelles** (parcelles, massifs, régions) et selon les contextes forestiers et industriels locaux.

6.2 PRENDRE EN COMPTE LES MULTIPLES ENJEUX SUR LA FORET ET LE BOIS, AUX COTES DU CARBONE

L'atteinte des trajectoires carbone implique d'actionner des leviers, tant au niveau de l'amont que de l'aval du secteur forêt-bois, dont les **implications sont souvent bien plus larges que la seule problématique du carbone**. De multiples critères et enjeux, loin d'être tous intégrés dans la présente étude, sont également à prendre en compte dans les orientations à donner au secteur. Des arbitrages peuvent être nécessaires entre des options parfois antagonistes ou qui cherchent à maximiser la fourniture de tel ou tel service à court, moyen ou long terme.

Si la récolte de bois en forêt est un élément majeur du bilan carbone, elle interagit aussi fortement avec de nombreux paramètres économiques, tels que les prix du bois sur des marchés souvent mondialisés, **l'emploi** notamment dans les milieux ruraux, **la vitalité de filières** assises sur la transformation du bois et *in fine* la création de valeur sur le territoire. Elle permet aussi d'éviter le recours aux importations de bois. La demande est d'ailleurs elle-même le fruit d'évolutions dans d'autres secteurs économiques pour lesquels l'usage du bois constitue un élément de transition écologique, en décarbonant l'économie. Le maintien ou le renforcement d'une filière bois dynamique et compétitive est aussi un facteur clé de réactivité et d'agilité en cas de crise pour valoriser rapidement et efficacement les bois impactés et ainsi préserver au mieux leur valeur économique tout en permettant de prolonger le stockage du carbone hors forêt.

Les **leviers pour une augmentation de la récolte en forêt concernent essentiellement la forêt privée**. Ils peuvent prendre la forme de mesures réglementaires ou juridiques concernant les problématiques foncières ou celles de documents de gestion durable. Il peut s'agir aussi d'investissements pour améliorer l'accessibilité des forêts, le renouvellement des forêts ou la structuration de la filière sylvicole. La certification forestière, l'animation et les actions de formation auprès des propriétaires sont d'autres leviers. Cependant l'ambition de cette massification de la gestion en forêt privée (cf. planification écologique⁵⁰) se trouve souvent limitée par divers freins sur le terrain (manque d'entreprises sylvicoles, de main d'œuvre, réticences des propriétaires, incertitudes sur le succès des travaux...). En forêt publique, compte tenu du niveau de gestion actuel, la hausse des prélèvements paraît d'autant plus complexe qu'elle ne pourrait reposer que sur l'exploitation de forêts situées dans des zones à forte sensibilité environnementale ou climatique (montagne et méditerranée).

Mais les questions de gestion forestière et de niveau de récolte de bois rejoignent également les enjeux autour de la fourniture des nombreux autres services écosystémiques rendus par la forêt. Un préalable à ces services est la **protection des forêts contre les risques**, en partie liés au changement climatique. Dans ce cadre, différentes stratégies peuvent être envisagées, certaines impliquant une baisse au moins temporaire des stocks de carbone en forêt, comme le sont les stratégies de renouvellement de peuplements vulnérables et sinistrés et celles d'une baisse volontaire des volumes exposés aux aléas.

Bien entendu, la protection de la biodiversité est un enjeu majeur à prendre en compte dans la gestion des forêts, notamment parce qu'elle constitue un levier favorisant l'adaptation parmi les solutions fondées sur la nature. **L'extension des aires protégées** notamment pour les forêts à fort enjeu écologique (cf. SNAP⁵¹ et SNB⁵²), et les **pratiques de gestion visant à protéger la biodiversité** telles que le maintien de bois mort et rémanents d'exploitation en forêt, ou la diversification avec des essences potentiellement moins productives en

⁵⁰ Secrétariat général à la planification écologique, 2023. La planification écologique pour la forêt.

<https://www.gouvernement.fr/upload/media/content/0001/06/94b5555866d658dedc6ae77125b6c8eaf7e1b835.pdf>

⁵¹ Gouvernement, 2021. Stratégie Nationale pour les Aires Protégées 2030.

https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/DP_Biotope_Ministere_strat-aires-protégees_210111_5_GSA.pdf

⁵² Gouvernement, 2023. Stratégie Nationale Biodiversité 2030. https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/Dossier-de-presse_SNB2030.pdf

reboisement, sont autant de facteurs influençant le bilan carbone mais indispensables à intégrer dans les trajectoires visées.

Les **attentes sociétales sont toujours plus nombreuses** autour de la forêt. Elles se traduisent à la fois par une acceptabilité de moins en moins forte de certains modes de gestion (coupes rases, enrésinement), mais aussi par un attrait de plus en plus fort pour l'utilisation du bois et pour les circuits locaux de production et de consommation. Ces tendances d'une partie de la société interrogent les pratiques en forêt et peuvent modifier les choix de gestion et de consommation, lesquels modifient à leur tour le bilan carbone.

Enfin, alors que l'expansion forestière historique est un des sous-jacents majeurs du puits de carbone forestier actuel, son évolution à l'avenir est intrinsèquement liée à des problématiques agricoles et urbaines qui dépassent le secteur de la forêt et du bois. Le secteur peut toutefois agir en **luttant contre le défrichement et en dynamisant la gestion des accrus** (cf. planification écologique⁵³).

6.3 LA NECESSITE D'UNE ADAPTATION DU SECTEUR FORET-BOIS AU CHANGEMENT CLIMATIQUE POUR ATTENUER L'EFFET DE SERRE

S'il y a encore quelques années, le secteur forêt-bois figurait comme l'idéale pompe à carbone de nos sociétés, il apparaît aujourd'hui évident que cette pompe est elle-même très fragilisée par les conséquences du changement climatique. **L'adaptation devient donc l'enjeu majeur** et un préalable au maintien du stockage, voire des stocks, de carbone en forêt. Et au-delà des impacts sur le bilan carbone, les effets du changement climatique ont des incidences sur la plupart des services écosystémiques liés à la forêt et au bois, rendant cette adaptation d'autant plus nécessaire.

S'adapter c'est accroître sa capacité de résilience face aux conséquences du changement climatique, en **abaissant la vulnérabilité** aux risques et dommages en anticipation, puis en **minorant les dégâts** lors des crises en se donnant les marges de manœuvre nécessaires pour agir. L'adaptation concerne de façon conjointe les trois composantes du système : **l'amont, l'aval**, mais aussi plus largement **la société**. En effet, les changements de comportements et d'habitudes des consommateurs favorisant les usages à longue durée de vie, le réemploi et le recyclage, ainsi que l'évolution du regard de chacun sur une forêt qui n'est pas immuable, font partie des facteurs indispensables à l'adaptation du secteur. Dans ce cadre, les **besoins de dialogue et de pédagogie** autour de ces recherches de compromis, à la fois auprès des différents acteurs professionnels mais aussi avec les citoyens, sont un enjeu majeur des années à venir.

Pour l'amont forestier, l'adaptation concerne directement les peuplements forestiers, mais aussi les pratiques de gestion et les modes de suivi des forêts.

Des investissements majeurs pour le **renouvellement des peuplements sinistrés, dépérissants ou vulnérables** constituent dans ce cadre une mesure forte, mais dont le succès technique dépend de la mise en œuvre effective (types de peuplements renouvelés, essences plantées, équilibre sylvo-cynégétique...). Plus globalement, le **choix d'essences compatibles avec le climat de demain et avec les services attendus par la société** figure parmi les défis en contexte incertain lors des renouvellements de peuplements, que ce soit par reboisement ou par régénération (processus qui reste largement majoritaire en France). Au-delà d'une adaptation "active" visant à maintenir certains services, des évolutions dans les peuplements forestiers auront sans doute lieu également via les processus d'adaptation naturelle des arbres.

Les leviers au niveau forestier concernent également les **pratiques sylvicoles**, notamment à travers les objectifs de production, les modes de traitements ou les itinéraires sylvicoles. Ces questions sont complexes et nécessitent sans doute des réponses locales, diversifiées et parfois expérimentales. Elles pourraient amener à adapter les

⁵³ Secrétariat général à la planification écologique, 2023. La planification écologique pour la forêt.
<https://www.gouvernement.fr/upload/media/content/0001/06/94b5555866d658dedc6ae77125b6c8eaf7e1b835.pdf>

durées de révolutions, les diamètres d'exploitabilité, et surtout les **objectifs de niveaux de volumes sur pied** dans les peuplements pour baisser le niveau de risque et gérer une ressource hydrique globalement à la baisse.

Dans tous les cas, ces potentielles nouvelles trajectoires en matière de gestion forestière menant à un changement d'état des forêts impliquent inexorablement le **passage par des phases de transition** et potentiellement de décapitalisation. Elles ne peuvent produire des **effets qu'à moyen ou long terme**, au-delà même de l'horizon 2050 ou 2080 de cette étude. L'adaptation, et particulièrement celle des forêts prend du temps, mais les choix doivent être initiés sans attendre tant que le bouquet des options techniques reste encore suffisamment large. Dans ce contexte, des erreurs sont inévitables mais elles doivent être acceptées car elles font partie du processus d'acquisition de connaissances sur le champ nouveau de l'adaptation.

Le changement climatique implique également une adaptation aux effets des crises, avec un enjeu majeur de valorisation des bois impactés pour optimiser le bilan carbone. Cela nécessite, du côté de la gestion, **une réactivité forte pour adapter les coupes en fonction de l'état des forêts**, en récoltant les arbres dépérissants avant qu'ils ne meurent et en ajustant les récoltes dans les autres peuplements. Dans ce cadre, l'adaptation du monitoring et une **surveillance régulière et renforcée des forêts** paraît indispensable pour permettre un pilotage plus réactif du système forêt-bois.

Ces récoltes sanitaires touchent également la filière, qui doit alors s'adapter à ces arrivées de bois qui sont fluctuantes, subies et de qualité moindre. L'enjeu d'un **développement de l'usage et de la demande de ces produits de crise, via des capacités de mobilisation, de transport, de stockage et de transformation adaptées et agiles**, passe sans doute par des investissements à l'innovation et dans des infrastructures dédiées. Ces évolutions reposent sur la caractérisation des ressources et leur marketing, mais aussi sur des changements culturels plus globaux liés à la perception du bois, de sa mise en œuvre et de son cycle de vie.

6.4 UNE PROSPECTIVE AVEC SES LIMITES, HYPOTHESES ET INCERTITUDES RENFORÇANT LES BESOINS DE RECHERCHE, D'ACQUISITION DE DONNEES ET DE PARTAGE DE CONNAISSANCES

La présente étude constitue un exercice de prospective. Les projections des différents scénarios simulés étudient des trajectoires possibles en matière d'évolution des forêts, de la filière et du bilan carbone mais **ne constituent en aucun cas des prévisions**. Cette étude embarque inévitablement un certain nombre de limites induites soit par des facteurs ne pouvant être pris en compte, soit par des hypothèses parfois nécessairement simplificatrices, soit par des incertitudes dans les valeurs des paramètres de modélisation.

Du fait des nombreux maillons de la chaîne de modélisation mise en œuvre pour aboutir au bilan carbone intégré amont-aval, les incertitudes inhérentes aux différents paramètres sont potentiellement importantes et souvent multiplicatives. **Certains résultats sont plus sensibles** que d'autres à ces incertitudes, notamment les valeurs de flux en volumes et les bilans carbone qui additionnent par construction les sources de variabilité des stocks sur pied par exemple. Par ailleurs, ces **incertitudes sont pour la plupart cumulatives sur l'horizon temporel** de l'étude, rendant les résultats à long terme moins robustes que ceux à court terme (cf. chapitre 5.5). Ces incertitudes ainsi que la grande variabilité interannuelle des résultats de flux, rendent également le calcul de points de passage annuels des scénarios peu adapté. Pour s'extraire de cette difficulté, il est nécessaire de considérer les résultats sur des fenêtres temporelles plus larges.

Le niveau d'incertitude varie grandement selon les paramètres considérés (cf. chapitre 5.5), sans qu'il ne soit nécessairement quantifiable. Ce constat appuie **l'importance dans l'interprétation de la prise en compte des analyses de sensibilité et de la diversité des scénarios simulés**, et renforce les besoins de travaux complémentaires sur des thématiques variées autour de l'évaluation de la biomasse et du carbone, des flux et des durées de vie dans la filière, dans l'estimation des différents types de récolte, etc. En fonction des sujets, ces

travaux nécessitent des avancées de la recherche, mais aussi des expertises pluridisciplinaires, ou de nouvelles acquisitions de données, etc.).

Au-delà des incertitudes scientifiques sur les valeurs de paramètres, une vigilance doit également être portée sur le manque de connaissance de l'évolution de certains facteurs dans un environnement changeant, et sur la difficulté de leur prise en compte dans un exercice de modélisation quantitative. Une des principales limites et perspectives d'amélioration concerne la prise en compte des effets du changement climatique et des risques associés. Il reste à ce jour difficile **de relier la croissance et la mortalité des arbres à l'évolution climatique**, déjà dans les observations historiques et encore plus dans les trajectoires climatiques futures (cf. TRACC⁵⁴). Les scénarios d'effets du climat simulés dans la présente étude illustrent l'impact majeur que pourrait avoir le changement climatique sur le bilan carbone et plaident pour avancer rapidement sur ces questions scientifiques essentielles. En ce sens, les recherches sur **la modélisation à base de processus avec forçage** par les scénarios de climat futurs régionalisés et débiaisés (cf. PEPR Forestt) ou sur la **modélisation plus statistique** des relations entre la croissance et les variations de température et de précipitations (toutefois complexe dans des conditions climatiques en extrapolation), pourraient permettre à terme une intégration plus explicite des impacts du climat sur la production. De même, les conséquences du changement climatique sur la mortalité font également l'objet de nombreuses perspectives de recherches, tant dans la connaissance des **effets de risques multiples sur la surmortalité des arbres** (cf. projet ciblé sur les risques multiples du PEPR Forestt) que dans la modélisation des événements extrêmes inducteurs de crises sylvo-sanitaires en climat futur (cf. PEPR TRACCS). Compte-tenu de leurs impacts, il devient en effet incontournable de prendre en compte dans les perspectives l'effet d'événements extrêmes de type tempêtes, incendies, crises biotiques émergentes ou cumuls d'aléas, même si leur survenue et ampleur sont par nature difficilement prévisibles.

Le changement de paradigme vers une gestion de plus en plus « adaptative » requiert également une adaptation des outils de projection de la ressource forestière. Une meilleure prise en compte des **évolutions de la sylviculture** avec l'augmentation des coupes sanitaires et des gestions de crise, ou **des évolutions de la composition en essences** avec des renouvellements et des changements d'espèces plus courants, représente un enjeu pour ce type d'études. Par ailleurs, l'intégration des spécificités locales dans la gestion de la diversité des forêts françaises apparaît primordiale afin de **décliner au mieux les résultats selon les territoires et les types de peuplements** et ainsi orienter les politiques d'adaptation, qui sont de plus en plus locales. Les modèles empiriques et à large échelle utilisés ici, permettent une projection robuste et exhaustive de la forêt française mais nécessitent des travaux pour améliorer la connaissance des facteurs de coupe de bois et la scénarisation de la gestion dans ce contexte d'adaptation (cf. projet Mobinter). Dans ce cadre, une **analyse des variables économiques et sociologiques** sous-jacentes aux différents scénarios étudiés serait pertinente afin d'évaluer les conditions de viabilité des trajectoires simulées.

L'amélioration de la représentation des flux de bois dans la filière, de la connaissance des durées de vie des produits, et la mise en cohérence des différents coefficients techniques constituent également des enjeux de recherche (cf. projet BACCFIRE), d'expertises croisées entre disciplines et de meilleur partage des informations entre les acteurs de la filière. L'impact sur le bilan carbone de ces facteurs se révèle non négligeable. Un suivi régulier et territorialisé de ces paramètres est nécessaire car ils évoluent directement selon les transitions économiques et industrielles.

Le grand nombre de résultats de cette étude à travers les 36 scénarios amont et les 20 scénarios intégrés amont-aval, **permet d'illustrer et d'appréhender une partie des limites** citées ci-dessus. Il constitue en ce sens une source de données et d'analyses variées. La gamme des trajectoires étudiées ici est volontairement construite autour d'orientations possibles et potentiellement réalistes, l'objectif étant de fournir des éléments d'aide à la décision et d'éclairer le débat public autour de stratégies pour le secteur forêt-bois. Cependant, dans une

⁵⁴ MTECT, 2023. La Trajectoire de Réchauffement de Référence Pour l'adaptation Au Changement Climatique (TRACC). <https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/document-reference-TRACC.pdf>

perspective d'analyses prospectives plus large, il apparaîtrait particulièrement intéressant de **tester d'autres scénarios, soit intermédiaires entre les trajectoires proposées, soit à l'inverse plus tranchés et extrêmes** afin de répondre à des questions théoriques mais néanmoins instructives sur la réaction du système à des bifurcations fortes et unidirectionnelles (scénarios visant une sanctuarisation massive de la forêt, ciblant des objectifs variés de capital sur pied, intégrant une catastrophe naturelle d'ampleur...). Dans ce cadre, il serait également pertinent de qualifier plus précisément les leviers d'actions et les sous-jacents de chacun des scénarios. Par ailleurs, les enjeux d'adaptation de plus en plus prégnants et le temps long des évolutions forestières incitent à prolonger les horizons temporels des telles simulations, afin d'étudier l'impact de scénarios à plus long terme, 2100 ou 2150. Cette perspective s'inscrit parfaitement dans le cadre d'études à visée scientifique, et devient plus facilement atteignable grâce à l'amélioration des outils et méthodes de projection.