



HAL
open science

Quel rôle pour les forêts et la filière forêt-bois françaises dans l'atténuation du changement climatique? Une étude des freins et leviers forestiers à l'horizon 2050

Alice Roux, Jean-François Dhôte, Claire Bastick, Antoine Colin, Alain Bailly, Jean-Charles Bastien, Alain Berthelot, Nathalie Bréda, Sylvain Caurila, Jean-Michel Carnus, et al.

► To cite this version:

Alice Roux, Jean-François Dhôte, Claire Bastick, Antoine Colin, Alain Bailly, et al.. Quel rôle pour les forêts et la filière forêt-bois françaises dans l'atténuation du changement climatique? Une étude des freins et leviers forestiers à l'horizon 2050. [0] Institut National de la Recherche Agronomique (INRA); Institut Géographique National (IGN). 2017, 97 p. hal-02790472

HAL Id: hal-02790472

<https://hal.inrae.fr/hal-02790472>

Submitted on 5 Jun 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License



QUEL RÔLE POUR LES FORÊTS ET LA FILIÈRE FORÊT-BOIS FRANÇAISES DANS L'ATTÉNUATION DU CHANGEMENT CLIMATIQUE ?

UNE ÉTUDE DES FREINS ET LEVIERS FORESTIERS À L'HORIZON 2050

RAPPORT DE L'ÉTUDE RÉALISÉE PAR L'INRA ET L'IGN - NOVEMBRE 2017



Responsables scientifiques :

Jean-François Dhôte – Inra, UR Amélioration, Génétique et Physiologie Forestières
Antoine Colin – IGN, Sciences pour l'Action et le Développement : Activités, Produits, Territoires

Directeur de la publication :

Bertrand Schmitt - Inra, Directeur de la Délégation à l'Expertise scientifique, à la Prospective et aux Etudes (DEPE)

Contacts :

Jean-François Dhôte : jean-francois.dhote@inra.fr
Antoine Colin : Antoine.Colin@ign.fr
Bertrand Schmitt : bertrand.schmitt@inra.fr

Pour citer ce document : Roux A., Dhôte J.-F. (Coordinateurs), Achat D., Bastick C., Colin A., Bailly A., Bastien J.-C., Berthelot A., Bréda N., Caurla S., Carnus J.-M., Gardiner B., Jactel H., Leban J.-M., Lobianco A., Loustau D., Meredieu C., Marçais B., Martel S., Moisy C., Pâques L., Picart-Deshors D., Rigolot E., Saint-André L., Schmitt B. (2017). Quel rôle pour les forêts et la filière forêt-bois françaises dans l'atténuation du changement climatique? Une étude des freins et leviers forestiers à l'horizon 2050. Rapport d'étude pour le Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, INRA et IGN, 101 p. + 230 p. (annexes).

Le présent document constitue le rapport d'une étude subventionnée par le Ministère de l'agriculture et de l'alimentation (MAA), sur le Programme 149, Action 12, Sous-action 26 (Domaine fonctionnel 149-12-26) et menée selon les principes et les règles de la Délégation à l'expertise, à la prospective et aux études (DEPE) de l'INRA. Il est accompagné d'un volume d'annexe contenant 14 notes émanant des experts et présentant l'ensemble des détails techniques des différents volets de cette étude.

Le contenu du rapport et des documents annexes n'engage que la responsabilité de leurs auteurs. Il ne peut donc être considéré comme la position du Ministère de l'agriculture et de l'alimentation.

QUEL RÔLE POUR LES FORETS ET LA FILIERE FORET-BOIS FRANÇAISES DANS L'ATTENUATION DU CHANGEMENT CLIMATIQUE ?

Une étude des freins et leviers forestiers à l'horizon 2050.

Alice Roux et Jean-François Dhôte (INRA, Coordinateurs) ;
Claire Bastick et Antoine Colin (IGN) ;

Alain Bailly ; Jean-Charles Bastien ; Alain Berthelot ; Nathalie Bréda ; Sylvain
Cauria ; Jean-Michel Carnus ; Barry Gardiner ; Hervé Jactel ; Jean-Michel Leban ;
Antonello Lobianco ; Denis Loustau ; Benoît Marçais ; Simon Martel ; Céline
Meredieu ; Christophe Moisy ; Luc Pâques ; Delphine Picart-Deshors ; Eric Rigolot ;
Laurent Saint-André ; Bertrand Schmitt.

Etude réalisée par l'INRA et l'IGN et financée par le Ministère de l'Agriculture et de
l'Alimentation dans le cadre du programme 149.

Le présent rapport n'engage que ses auteurs et ne saurait être considéré comme la
position du Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation.

Novembre 2017

SOMMAIRE

SIGLES ET ACRONYMES	5
AVANT-PROPOS	7
INTRODUCTION Les enjeux d'une étude sur le rôle de la filière forêt-bois dans l'atténuation du changement climatique	9
CHAPITRE I. Les différentes composantes du bilan carbone de la filière forêt-bois : quelles contributions actuelles à l'atténuation du changement climatique ?	15
I. Compartiments de comptabilisation carbone dans la filière forêt-bois : les coefficients et hypothèses issus de l'état de l'art	15
I.1. Stockage de carbone dans l'écosystème forestier	15
I.2. Stockage dans les produits bois ou à base de bois au sein de la filière	19
I.3. Les effets de substitution	20
II. Bilan carbone de la filière forêt-bois française et les facteurs influençant son évolution..	23
II.1. Les composantes du bilan carbone de la forêt française en 2013.....	23
II.2. Les facteurs qui pourraient faire évoluer ce bilan carbone de la filière à l'horizon 2050	24
CHAPITRE II. Une démarche de modélisation permettant de prendre en compte plusieurs options de gestion forestière et les évolutions du climat pour un bilan carbone à horizon 2050.....	27
I. Le modèle de ressource forestière de l'IGN : projection de la ressource et des disponibilités brutes	27
I.1. Principe et fonctionnement : Simulateur de l'évolution de la ressource forestière	29
I.2. Des modèles représentatifs de la forêt française et robustes en projection	30
III. Un modèle de filière (FFSM) pour une analyse économique des scénarios	30
IV. Le modèle GO+ pour intégrer les effets climatiques sur les facteurs de production forestière.....	33
CHAPITRE III. Incidence de trois scénarios de gestion et de deux scénarios climatiques sur le bilan carbone et le bilan économique de la filière forêt-bois française à l'horizon 2050.....	35
I. Trois scénarios de gestion contrastés pour la filière forêt-bois française à l'horizon 2050	35
I.1. Scénario « Extensification et allègement des prélèvements »	36
I.2. Scénario « Dynamiques territoriales »	39
I.3. Scénario « Intensification et augmentation des prélèvements, stimulée par un plan de reboisement actif »	40
I.4. Des scénarios de gestion et un plan de reboisement mis en discussion.....	45

II. La prise en compte des effets d'une possible aggravation des effets du changement climatique à l'horizon 2050.....	47
III. Mode de complémentarité des scénarios et démarche de simulation	47
III.1. Détermination des niveaux de prélèvements	48
III.2. Modification des paramètres de dynamique forestière en cas d'aggravation des effets du changement climatique	49
IV. Analyse des résultats obtenus pour les différentes composantes du bilan carbone ..	50
IV.1. Dynamique forestière et analyse des évolutions (2016-2050) des composantes du bilan carbone selon les scénarios de gestion et les scénarios climatiques	50
IV.2. Eléments d'analyse économique : les efforts collectifs nécessaires à l'accroissement des prélèvements visé par le scénario « Intensification »	64
V. Conclusion	70
CHAPITRE IV. Impacts de crises majeures sur le bilan carbone de la filière forêt-bois à l'horizon 2050	71
I. Des crises forestières majeures liées à des combinaisons d'aléas biotiques et abiotiques	71
I.1. Pourquoi intégrer des crises dans les simulations ?	71
I.2. Quels aléas ont-été choisis et pourquoi ?	73
I.3. Synthèse des scénarios de crises analysés et leur implémentation dans la modélisation	79
II. Dégâts causés par les crises majeures et effets sur le bilan carbone de la filière forêt-bois française.....	80
DISCUSSION, CONCLUSIONS ET BESOINS DE RECHERCHE	87
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	93

SIGLES ET ACRONYMES

AGPF : Amélioration Génétique et Physiologie Forestière
 BE : Bois-énergie
 BEF : *Biomass Expansion Factor*
 BFT : Bois Fort Tige
 BI : Bois d'industrie
 BO : Bois d'œuvre
 CC : Changement Climatique
 C : Carbone
 CCNUCC : Convention Cadre des Nations Unies pour le Changement Climatique
 CGAAER : Conseil Général de l'Alimentation, de l'Agriculture et des Espaces Ruraux
 CITEPA : Centre Interprofessionnel Technique d'Etudes de la Pollution Atmosphérique
 DEPE : Délégation à l'Expertise scientifique collective, à la Prospective et aux Etudes
 EAB : Enquête Annuelle de Branche
 EFFIS : *European Forest Fire Information System*
 EsCo : Expertise Scientifique Collective
 FCBA : Institut technologique Forêt Cellulose Bois-construction Ameublement
 FFN : Fonds Forestier National
 FFSM : *French Forest Sector Model*
 FWI : *Fire Weather Index*
 GES : Gaz à Effet de Serre
 GIEC : Groupe International d'Experts sur le Climat
 GRECO : Grandes Régions Ecologiques
 ICP: *International Co-operative Program*
 IFM : Indice Forêt Météo
 IFN : Inventaire Forestier national
 IGN : Institut National de l'Information Géographique et Forestière
 INRA : Institut National de la Recherche Agronomique
 IPCC : *Intergovernmental Panel on Climate Change*
 ISPA : Interactions Sol-Plante-Atmosphère
 LEF: Laboratoire d'Economie Forestière
 MAA : Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation
 MARGOT : *MAtrix model of forest Resource Growth and dynamics On the Territory scale*
 MFR : Matériel Forestier de Reproduction
 N : Nord
 NE : Nord-Est
 PME : Petite et Moyenne Entreprise
 RENECOFOR : REseau National de suivi à long terme des ECOsystèmes FORestiers
 RCP : *Representative Concentration Pathway*
 R&D : Recherche et Développement
 SCAR : *Standing Committee on Agricultural Research*
 URFM : Unité de Recherche écologie des Forêts Méditerranéennes
 VAT : Volume Aérien Total

AVANT-PROPOS

La présente étude a été réalisée par l'INRA et l'IGN et financée par le Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation (MAA). Le CGAAER avait en amont de ce travail pris l'initiative de solliciter l'INRA pour mener une réflexion de ce type dans les suites du rapport du Conseil général analysant la façon dont l'agriculture et la forêt françaises pouvaient contribuer à la lutte contre le changement climatique (Madignier *et al.*, 2014). L'étude a été conduite par la Délégation à l'Expertise scientifique collective, à la Prospective et aux Etudes (DEPE) de l'INRA et selon les principes et les règles de conduite des expertises et des études qui régissent les travaux menés par cette structure. La DEPE conduit et coordonne trois types d'opérations le plus souvent sur commandite des pouvoirs publics ou de partenaires extérieurs (le plus souvent parapublics) :

- Les Expertises Scientifiques Collectives (ESCo) consistent à réaliser un état de l'art et un assemblage des connaissances scientifiques existantes pour souligner les acquis, les incertitudes et les lacunes de connaissances, et mettre à jour les controverses scientifiques.
- Lorsque la littérature disponible n'est pas suffisante pour répondre précisément aux questions posées par les pouvoirs publics, une démarche de type « Etude » pluridisciplinaire est mise en place. Les Etudes présentent un fort degré de parenté avec les ESCo dont elles intègrent la démarche et qu'elles complètent avec la création de données nouvelles (collecte, analyses statistiques, calculs, simulations).
- Les prospectives visent à proposer à la réflexion des visions du futur (ou scénarios) en explorant le plus systématiquement possible des conjectures d'évolution basées sur les connaissances scientifiques disponibles.

L'étude présentée ici emprunte à chacune de ces trois approches. Visant à examiner différentes stratégies de gestion forestière en vue d'activer au mieux les leviers forestiers d'atténuation du changement climatique, elle se positionne à l'horizon 2050, horizon plus lointain que celui examiné par nombre de travaux antérieurs. Bien que trop proche pour illustrer certains phénomènes à longue portée induits par la dynamique forestière, cet horizon permet de comparer de manière intégrée diverses options de mobilisation de la ressource. Pour ce faire, des scénarios contrastés de fonctionnement de la filière ont été élaborés et l'étude propose un plan de reboisement cohérent au vu des caractéristiques fines de la forêt française, conçu pour amplifier l'impact climatique favorable de la forêt au-delà de 2050. Par ailleurs, les effets sur la dynamique de la filière forêt-bois de ces scénarios sont simulés en mobilisant simultanément trois modèles qui n'ont que rarement fonctionné en interaction et à un horizon aussi lointain ; ils atteignent ici certaines de leurs limites méthodologiques. L'établissement des bilans carbone des différents compartiments de la filière forêt-bois s'appuie en outre sur des hypothèses et des coefficients sur lesquels la littérature scientifique disponible repère de fortes incertitudes concernant certains facteurs clés des processus concernés. Enfin, il est apparu nécessaire, compte tenu des aléas climatiques, biotiques et abiotiques qui pourraient affecter la forêt française dans les décennies à venir, d'introduire dans l'analyse les impacts du changement climatique ainsi que des crises majeures. Ces dernières, très complexes à concevoir, sont introduites sous la forme d'un cortège de risques associés, forme originale et réaliste mais qui accroît la complexité du dispositif.

Cette étude a cherché à relever simultanément de nombreux défis et, ce faisant, elle se place à la limite des connaissances actuelles et des capacités des outils d'analyse disponibles. Les résultats sur lesquels elle débouche sont donc à prendre, comme d'usage,

avec toutes les précautions requises en tenant compte notamment des incertitudes fortes qui portent sur certains des mécanismes clés et des choix qui est indispensable de faire pour mener à bien un tel travail. Si ces choix sont le plus souvent raisonnés, ils sont parfois contraints par les outils disponibles ou par la multiplicité des options possibles. Quoiqu'il en soit, ils ont été faits avec le moins d'arbitraire possible.

Le dispositif conçu pour cette étude répond à la complexité des processus de décision en situation d'incertitude, c'est-à-dire en condition non-stationnaire et sous forts aléas, à partir d'une connaissance incomplète. Cette situation, commune à d'autres domaines d'activité nécessitant une projection à long terme, prend un relief particulier pour les forêts, compte tenu de l'inertie des dynamiques ainsi que de la fréquence et de la gravité croissante des dégâts forestiers. Même entachés d'incertitude, un système de modèles pertinents pour la question posée et un jeu de paramètres constituent une information indispensable ; et parmi le jeu des modèles mobilisés, nous avons défini des règles sur les résultats et la manière dont ils contribueraient aux conclusions d'ensemble et à leurs nuances. En somme, nous avons cherché ici à suivre le conseil de Box « *Tous les modèles sont faux ; certains sont utiles* » (Box & Draper, 1987).

Cette étude a été pilotée scientifiquement par Jean-François Dhôte (INRA, UR AGPF) et coordonnée par Alice Roux (INRA-DEPE), chef de projet, secondée par Marc-Antoine Caillaud (INRA-DEPE) et épaulée par Bertrand Schmitt, directeur de la DEPE. L'appui administratif et logistique a été assuré par Kim Girard (INRA-DEPE).

Le travail a été réalisé par un groupe d'experts scientifiques réunissant des chercheurs et ingénieurs d'AgroParisTech, de l'IGN, de l'INRA, et du FCBA. Ceux-ci ont été qualifiés et sollicités pour leurs compétences spécifiques sur les différentes thématiques abordées dans cette étude (cf. [Annexe 1](#)). Outre le pilote scientifique, Jean-François Dhôte, ce collectif d'experts était constitué de : Alain Bailly (FCBA) ; Jean-Charles Bastien (INRA) ; Claire Bastick (IGN) ; Alain Berthelot (FCBA) ; Nathalie Bréda (INRA) ; Sylvain Cauria (INRA) ; Jean-Michel Carnus (INRA) ; Antoine Colin (IGN) ; Barry Gardiner (INRA) ; Hervé Jactel (INRA) ; Jean-Michel Leban (INRA) ; Antonello Lobianco (AgroParisTech) ; Denis Loustau (INRA) ; Benoît Marçais (INRA) ; Céline Meredieu (INRA) ; Luc Pâques (INRA) ; Eric Rigolot (INRA) ; Laurent Saint-André (INRA).

Un Comité de suivi, réunissant les représentants du ministère financeur (MAA), du CGAAER, des représentants d'autres administrations concernées, de professionnels et de parties prenantes aux questions traitées a également été constitué. Il était formé de : Sylvie Alexandre (MTES) ; Miriam Buitrago (ADEME) ; Frédéric Branger (MAA) ; Jacques Chevalier (CSTB) ; Florian Claeys (MAA) ; Pierre Claquin (MAA) ; Pierrick Daniel (MAA) ; Christine Deleuze (ONF) ; Gérard Deroubaix (FCBA) ; Yves Duclerc (MTES) ; Isabelle Feix (ADEME) ; Elisabeth Pagnac-Farbiaz (MTES-DGEC) ; Jean-Luc Peyron (GIP-EcoFor) ; Olivier Picard (CNPFF-IDF) ; Jean-François Soussana (INRA) ; Bernard Roman-Amat (CGAAER) ; Mickael Thierry (MTES) ; Michel Vallance (CGAAER) ; Lise Wlérick (MAA).

Enfin, une version précédente de ce rapport et sa version actuelle ainsi que ses annexes ont grandement bénéficié d'une relecture critique de trois scientifiques extérieurs au projet : Erwin Dreyer (INRA), Jean-Marc Guehl (INRA) et Mériem Fournier (AgroParisTech), auxquels s'est adjoint Jean-Luc Peyron dont les remarques sur cette version ont été précieuses.

INTRODUCTION

Les enjeux d'une étude sur le rôle de la filière forêt-bois dans l'atténuation du changement climatique

En vue de limiter le changement climatique en cours, la réduction des émissions nettes de gaz à effet de serre (GES) et le stockage de carbone sont des objectifs d'importance majeure au niveau mondial que chaque échelon national a vocation à décliner. Les forêts et, plus largement, la filière forêt-bois constituent un secteur stratégique pour l'atténuation du changement climatique, notamment grâce à leur capacité de stockage de carbone et donc de l'atténuation de l'augmentation du CO₂ atmosphérique. Leur intérêt s'explique par un effet combiné de stockage dynamique et réversible du carbone dans les écosystèmes et dans les produits issus de la filière et par un effet de substitution cumulative et définitivement acquise, résultant de l'usage du bois en remplacement d'énergies ou de matériaux concurrents, non renouvelables et présentant des bilans carbone moins favorables (Eriksson *et al.*, 2007). Dans ce contexte, le CGAAER du Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation (MAA) a sollicité l'INRA pour réfléchir à l'opportunité d'une étude sur le potentiel d'atténuation des émissions de CO₂ par la filière forêt-bois française à l'horizon 2050. Le présent rapport fait suite à une première étude de l'INRA sur les leviers forestiers en termes d'atténuation pour lutter contre le changement climatique, publiée en juin 2016 et réalisée dans le cadre d'une réponse à un Marché référencé SSP-DGPAAT-2015-022 (Dhôte *et al.*, 2016). Ces deux études emboîtées concernent à la fois les forêts de France métropolitaine disponibles pour la production de bois (au sens de l'inventaire des ressources forestières mis en œuvre par l'IGN), les industries qui transforment sous diverses formes les produits ligneux qui en sont issus, et les acteurs sociaux qui contribuent directement à cette chaîne de production primaire et de transformation. C'est cet ensemble qui constitue la « filière forêt-bois ».

La forêt française de métropole, objet du présent travail, s'étend sur 15,86 millions d'hectares pour la forêt de production (campagnes IGN 2010-2014), soit 30 % du territoire (IGN, 2016). On estime qu'elle a doublé de surface depuis le minimum historique situé vers 1830 (Bontemps, 2017) et cette expansion se poursuit au rythme très soutenu de 96 000 ha/an en moyenne depuis 1985 (IGN, 2016). Le volume de bois sur pied a doublé en 50 ans, ce qui fait de la forêt française la troisième la plus riche d'Europe, après l'Allemagne et la Suède qu'elle devrait dépasser prochainement si la dynamique actuelle se poursuit. Son stock s'accroît de 27 millions de m³ de volume bois-fort tige par an (Hervé *et al.*, 2016). Cette forêt est hétérogène à toutes les échelles, depuis celle des paysages (les sylvo-éco-régions extrêmes ont des taux de boisement allant de moins de 10 % à près de 70 %) jusqu'à celle de la parcelle, les taillis-sous-futaie sur plateaux calcaires de l'Est constituant, par exemple, des forêts très riches en espèces. Autre originalité en Europe, c'est une forêt aux trois quarts privée, l'État détenant 9 % des surfaces (forêts domaniales) et les collectivités 17 % (essentiellement des forêts communales). Appartenant à environ 3,3 millions de propriétaires, la forêt privée est constituée pour 36 % de sa surface de petites unités de moins de 10 ha et 47 % de plus de 25 ha (FCBA, 2016). Plus de cent espèces ligneuses sont recensées par l'IGN. Les 12 espèces les plus abondantes représentent seulement 40 % du total du volume sur pied : Chênes pédonculé, sessile et pubescent, Hêtre, Châtaignier, Charme, Frêne chez les feuillus, Sapin pectiné, Épicéa commun, Pins sylvestre et maritime, Douglas chez les résineux. Les arbres feuillus représentent 67 % de la surface, 64 % du volume sur pied et 60 % de son

accroissement annuel (IGN, 2016). Les méthodes sylvicoles sont assez variées, du fait des différences de propriété, potentialités des milieux, objectifs ou contraintes de gestion. Les industries de première transformation (pâte à papier, panneaux de fibres ou particules, contreplaqués, sciages) sont concentrées dans une large bande allant du Sud-Ouest au Nord-Est (Aquitaine, Auvergne-Rhône-Alpes, Centre, Bourgogne-Franche-Comté, Grand-Est). La transformation des feuillus est en recul continu depuis 30 ans, 80 % des sciages produits actuellement étant d'origine résineuse. Quels soient feuillus ou résineux, les gros et très gros bois trouvent plus difficilement preneur, du fait des procédés et technologies qui valorisent mieux les bois de grosseur intermédiaire (bois reconstitués, sciage canterö). La valorisation en bois-énergie est en forte croissance, et s'approvisionne souvent au détriment du bois d'industrie (voire du bois d'œuvre), du fait des rigidités de l'offre.

La filière forêt-bois française, qui est restée largement artisanale, se trouve placée par la crise climatique à la croisée des chemins. D'abord, la prise de conscience des risques associés au réchauffement inciterait *a priori* les acteurs de tous les secteurs à préférer une attitude proactive d'anticipation, transformation, programmation et diversification, ce qui suppose un effort d'investissement dans la durée. Ensuite, l'émergence de la bioéconomie, vue comme un vaste chantier de reconfiguration des procédés et façons de produire (circularité, ressources renouvelables, limites posées par la durabilité des pratiques en amont et le recyclage en aval, sobriété en émissions, pollutions mais aussi consommation de ressources minérales rares ; Dittrich *et al.*, 2012 ; Bihouix, 2014), pousse la filière forêt-bois à devenir une voie essentielle d'approvisionnement de cette nouvelle économie, donc à changer d'échelle et d'ambition dans ses finalités industrielles (Sedjo & Sohngen, 2013 ; Mathijs *et al.*, 2015). Enfin, les forestiers ont mis en œuvre depuis longtemps, et de manière plus formalisée depuis les grandes conventions internationales découlant du Sommet de Rio et les directives européennes sur la protection de la nature et de la biodiversité, diverses pratiques de gestion multifonctionnelle des forêts qui assurent un équilibre entre la production de bois et les autres services écosystémiques, pour la plupart non marchands, rendus par les forêts (protection de la biodiversité, eau de qualité, aménités, régulation du climat...). Les formes concrètes de cette pratique multifonctionnelle sont aujourd'hui remises en question à la fois par la transformation des enjeux, notamment le rôle structurant des risques, et par la reformulation de certaines contraintes (impacts environnementaux à distance induits par le commerce international ; ré-émergence de pressions sur l'usage des terres découlant d'une relocalisation des productions et d'objectifs accrûs de durabilité).

L'objectif de la présente étude, en cherchant à évaluer plus complètement les contributions possibles des forêts et de la filière forêt-bois à la politique climatique nationale, avec ses leviers et ses freins, est d'apporter des éclairages pour concevoir de nouveaux instruments de politique publique. En Europe, le débat des dernières années porte sur les différentes stratégies possibles pour accentuer le rôle, déjà considérable, des forêts dans l'atténuation du changement climatique (Rautiainen *et al.*, 2010 ; Nabuurs *et al.*, 2015). Actuellement, la plupart des forêts européennes stockent du carbone, les prélèvements étant nettement inférieurs à l'accroissement biologique net. C'est en France que cet écart est le plus prononcé (de l'ordre de 70 MtCO₂/an). Vis-à-vis du changement climatique, cette accumulation est ambivalente : d'une part, elle constitue un puits de carbone très significatif qui vient compenser les émissions brutes (à hauteur de 10 % en moyenne continentale) ; d'autre part, l'insuffisance de gestion et les niveaux croissants de capital sur pied qui la sous-tendent pourraient impliquer à moyen et long terme une vulnérabilité accrue aux impacts du changement climatique, notamment aux grandes crises (sécheresses, tempêtes, incendies, ravageurs) dont la

réalisation entraînerait des relargages massifs de carbone vers l'atmosphère et pourrait remettre en question des bénéfices-carbone accumulés (Seidl *et al.*, 2014 ; Galik & Jackson, 2009). Parallèlement, l'option consistant à freiner la capitalisation en cours, par une augmentation des récoltes, peut offrir elle aussi des bénéfices climatiques, à travers la réduction des émissions que permet l'usage du bois, par substitution à des ressources concurrentes, comme matériau ou comme énergie.

La question qui se pose est donc de choisir comment orienter la contribution des forêts à l'atténuation du changement climatique, en jouant sur quatre leviers pour le carbone : stockage dans l'écosystème, stockage dans les produits, substitution sous forme de matériau, substitution sous forme d'énergie (Pingoud *et al.*, 2010 ; Thürig & Kaufmann, 2010). En simplifiant, le jeu sur ces quatre leviers (non indépendants) résulte de deux grands arbitrages, plus ou moins faciles à atteindre *via* les politiques publiques : un premier arbitrage sur l'usage des sols forestiers (remise en gestion et intensification *versus* poursuite de l'extensification), un second sur le poids respectif des différentes voies de valorisation industrielle du carbone forestier (bois-massif, fibres, chimie, énergies \dots), la compétition et les synergies s'exerçant à la fois entre ces différentes voies, entre procédés élémentaires et avec les matériaux concurrents (Schwarzbauer & Stern, 2010). La réponse à cette question doit tenir compte des différents services attendus des forêts (en particulier, certains dispositifs de conservation conduisent à accumuler du carbone, pour des raisons qui ont peu à voir avec le climat mais sont justifiées par un effet recherché sur la biodiversité). Elle doit être formulée à des échelles spatiales et temporelles appropriées : dans un contexte de gestion durable des forêts, le problème se pose à l'échelle des entités aménagées et *supra*, pas à l'échelle de l'écosystème ; dans le temps, on doit articuler les effets immédiats sur l'intensité du puits ou l'activité industrielle avec les effets différés résultant des impacts plus ou moins profonds des perturbations à venir. S'agissant d'un milieu naturel géré et productif, il ne serait pas pertinent de raisonner sur un continuum sol-forêt-atmosphère, isolé et ignorant les conséquences indirectes des usages du bois (par substitution). La gestion forestière est une activité intégrée qui, outre l'équilibre entre les fonctions, apporte une réponse de synthèse aux différentes facettes de l'enjeu climatique, c'est-à-dire qu'elle répond simultanément aux besoins d'atténuer le changement climatique, de se prémunir de ses conséquences par l'adaptation des pratiques, d'accroître la résilience d'ensemble pour surmonter les crises et d'assurer une certaine stabilité des différents services écosystémiques fournis. Enfin, la réponse à la question posée doit se comprendre comme localisée, c'est-à-dire déclinée par régions biogéographiques, types de propriété et types de peuplement, définissant ainsi des configurations spécifiques d'enjeux, opportunités et contraintes qui peuvent appeler des solutions localement différenciées.

Pour éclairer cette question, nous avons poursuivi deux objectifs non indépendants :

- Sur le plan des finalités, proposer une méthode d'évaluation du bilan-carbone de la forêt et de la filière forêt-bois qui considère les principales composantes du bilan pour répondre au besoin exprimé par Guehl *et al.*, 2016 : « *Manifestement, les règles actuelles internationales de comptabilisation du carbone séquestré ou évité par la filière forêt-bois sont insuffisantes et ne permettent pas véritablement de fonder une politique efficace d'atténuation du changement climatique. Il est temps de le reconnaître pour proposer à partir d'elles, ou en parallèle, une méthode globale d'évaluation du bilan carbone de la forêt et du bois* ».
- Sur le plan scientifique, faire interagir trois modèles dynamiques permettant d'éclairer les principales interactions : climat-végétation, comportement économique des acteurs,

dynamique spatialement distribuée de populations d'arbres ordonnées par taille, ainsi que plusieurs communautés scientifiques concourant à renseigner les régularités et accidents de ces systèmes dynamiques compliqués que sont les forêts gérées. Nous avons donc tenté d'éviter la critique de Legay (1986) : « *Ce qui fait la médiocrité de certains travaux pluridisciplinaires, ce n'est pas la qualité des chercheurs qui les ont menés, ni le manque de travail, c'est l'erreur méthodologique, le refus de se restreindre à tout dire, à tout écrire, et de réfléchir après, après avoir acquis ce corps de données et non le contraire* ».

Quatre grands leviers d'atténuation des émissions de CO₂ par la forêt sont identifiés en vue d'élaborer un bilan carbone de la filière forêt-bois (Madignier *et al.*, 2014 ; Dhôte *et al.*, 2016). Deux d'entre eux concernent directement le stockage de carbone : dans l'écosystème forestier tout d'abord (bois sur pied, bois mort et sols forestiers) ; dans les produits bois ou à base de bois, une fois celui-ci prélevé en forêt et mobilisé au sein de la filière forêt-bois. Les deux autres sont plus indirects et concernent les émissions de gaz à effet de serre (GES) évitées grâce au recours à des produits bois plutôt qu'à des produits concurrents plus émetteurs de GES. Ces effets de substitution prennent deux formes de nature fort différente : la substitution bois-énergie et la substitution bois-matériaux (Lippke, 2009). La première, de faible rendement par rapport à des sources comme le gaz, émet du carbone lors de sa combustion, alors que la seconde, qui n'a rien à voir avec le contenu en carbone du bois, manifeste surtout le fait que la transformation du bois requiert moins d'énergie que les matériaux concurrents.

En vue d'analyser la façon dont ces quatre leviers sont aujourd'hui mobilisés par les forêts et la filière forêt-bois françaises et la façon dont leur rôle pourrait être renforcé à l'avenir, nous avons tout d'abord procédé à une revue de la littérature scientifique internationale (dont on trouvera en [Annexes 2, 3 et 4](#) du présent rapport la synthèse critique détaillée) permettant d'affiner les hypothèses et les coefficients utilisés dans le contexte français pour élaborer le bilan carbone de la filière. Par ailleurs, trois scénarios de gestion forestière, considérés comme plausibles à l'horizon 2050, ont été imaginés : le premier, appelé « Extensification », peut être considéré comme accentuant les tendances actuelles de mobilisation décroissante de la ressource ; le second, dénommé « Dynamiques territoriales », est marqué par une forte hétérogénéité entre les régions, prolongeant les divergences actuelles avec des régions actives qui le demeurent *versus* des régions durablement peu interventionnistes, ce qui revient à augmenter de façon conséquente les volumes prélevés annuellement puisque la ressource française est en expansion ; le troisième, désigné comme un scénario « Intensification », combine une gestion plus active de la forêt, entraînant de fortes augmentations des taux de prélèvements, notamment en forêt privée, et un plan de reboisement de 500 000 ha en dix ans visant à accroître à moyen terme la productivité sur une partie ciblée des forêts (Hedenus & Azar, 2009). Ce dernier scénario reprend ainsi, en les précisant, les grandes lignes de la proposition du rapport CGAAER (Madignier *et al.*, 2014).

Les conséquences de ces trois scénarios contrastés en matière de dynamique de la ressource, des prélèvements et des usages du bois récolté ont été simulées jusqu'à l'horizon 2050 en combinant les résultats de trois modèles. Placé au cœur du dispositif, le **modèle de ressource de IBGN, MARGOT**, permet d'obtenir, par période quinquennale, l'évolution des stocks sur pied, les volumes annuels de bois mort ainsi que les volumes récoltés selon leurs usages, fixés de façon exogène au(x) modèle(s) sauf dans le cas où le scénario prévoit une poursuite du trend actuel. C'est sur la base de ces résultats qu'il peut être réalisé, aux différentes périodes quinquennales allant de 2016 à 2050, un bilan carbone des différents compartiments de la filière forêt-bois française : stockage du carbone dans l'écosystème forestier (sur pied, bois

mort et sols) ; stockage du carbone dans les produits bois ; émissions de GES évitées par effets de substitution dans le secteur de l'énergie et dans les secteurs des matériaux.

Parallèlement et indépendamment des simulations MARGOT, deux de ces trois scénarios, « Extensification » et « Intensification », ont fait l'objet d'une analyse économique menée à partir du **modèle économique FFSM**. Il s'agit d'examiner la faisabilité économique de ces scénarios et les modifications que devrait subir la filière pour que ces scénarios adviennent, notamment en matière de transformation et de consommation de produits bois. Ainsi, la mobilisation de FFSM permet d'identifier les gains qui pourraient être attendus, au sein de la filière, lors de l'implémentation de l'un ou l'autre des scénarios.

Pour prendre en compte l'éventuelle accentuation du changement climatique, on a dû compléter le modèle démographique de l'IGN par les résultats provenant d'un modèle intégrant plus directement les processus biophysiques intervenant dans la croissance forestière, le **modèle GO+**. Dans la mesure où, au-delà des effets tendanciels du changement climatique, on fait l'hypothèse que certaines crises majeures peuvent, d'ici 2050, concerner les forêts françaises et affecter plus ou moins lourdement leurs capacités de stockage du carbone, on a introduit dans certains scénarios de gestion trois types de crises : un épisode incendiaire de grande ampleur, aggravé par le changement climatique ; une tempête de niveau important dévastant comme Lothar-Martin et Klaus les massifs forestiers français, sachant qu'un tel événement extrême est suivi d'une pullulation de scolytes sur les résineux et de épisodes incendiaires conséquents ; différents types d'invasions biologiques touchant les pins ou les chênes. L'impact sur le bilan carbone de ces crises est également évalué pour chacun des compartiments de la filière forêt-bois.

Pour mener à bien une étude pluridisciplinaire de cette envergure, le collectif d'experts, piloté par Jean-François Dhôte (INRA, UR AGPF) et Alice Roux (INRA-DEPE), chef de projet, a rassemblé des spécialistes de divers horizons (on trouvera en [Annexe 1](#), le détail des spécialités de chacun des experts mobilisés). Ils combinent les compétences nécessaires à la prise en charge de :

- La collaboration des états de l'art international sur les 4 leviers d'atténuation des émissions de CO₂ par la forêt identifiés (stockage de C dans l'écosystème forestier et les produits bois, substitution bois-énergie et bois-matériau), constituant le volet ESCo ;
- La construction des scénarios de gestion et, notamment, la définition très précise du plan de reboisement inclus dans le scénario « Intensification » ;
- La mise en œuvre de la stratégie de modélisation associant modèle démographique de l'IGN, modèles biophysique et économique de l'INRA ;
- La définition et l'implémentation des trois types de crises biotiques et abiotiques envisagés.

Sur ces bases, le rapport qui suit synthétise les principaux résultats de cette étude, les détails notamment méthodologiques et **toutes les précisions concernant les résultats étant rassemblés dans les 14 annexes du volume complémentaire de ce rapport**. Un **premier chapitre** présente **les hypothèses et les coefficients** qui apparaissent **les plus pertinents** et les mieux adaptés au contexte français. Il débouche sur **un chiffrage du bilan-carbone actuel** des différents compartiments de la filière forêt-bois française qui permet de visualiser la contribution des leviers forestiers d'atténuation du changement climatique. Un **second chapitre** présente **les principes qui régissent les trois modèles** mobilisés pour simuler les conséquences de scénarios de gestion à l'horizon 2050. La logique qui préside à la réalisation des trois scénarios de gestion envisagés est présentée dans le **chapitre 3** et les **résultats**

des simulations réalisées pour chacun d'eux, traduits en bilan carbone, y sont présentés et discutés. Le **chapitre 4** propose **les trois types de crises majeures envisagés** et leurs conséquences en termes de bilan-carbone y sont détaillées. Enfin, un **chapitre conclusif** récapitule, entre autres, les besoins de recherche qui seraient nécessaires de mettre en œuvre pour dépasser les limites, notamment méthodologiques, discutées tout au long de cette étude.

CHAPITRE I. Les différentes composantes du bilan carbone de la filière forêt-bois : quelles contributions actuelles à l'atténuation du changement climatique ?

Les forêts et la filière forêt-bois sont considérées aujourd'hui comme un secteur d'activité stratégique pour l'atténuation du changement climatique (Grassi *et al.*, 2017 ; Madignier *et al.*, 2014) combinant un effet de stockage de carbone dans les écosystèmes forestiers et dans les produits-bois, et un effet de substitution du bois à des matériaux et énergies fossiles plus largement émetteurs de GES. Dans ce premier chapitre, nous reviendrons sur chacun des 4 leviers de stockage et de substitution identifiés au sein de la filière permettant l'atténuation des émissions nettes de GES. Au-delà des débats sur les options à retenir pour élaborer le bilan carbone de la filière, la question qui se pose est de savoir s'il est, à terme, plus intéressant de favoriser le stockage du carbone dans l'écosystème forestier en limitant les prélèvements ou, au contraire, d'insister sur le stockage en produits bois et sur les effets de substitution en stimulant les usages des produits issus de la filière forêt-bois.

C'est pourquoi, dans ce chapitre, nous expliciterons les coefficients de stockage et substitution ainsi que les hypothèses retenues ici pour le calcul du bilan carbone de la filière pour chacun de ces leviers. Le bilan carbone établi sous ces hypothèses pour l'année 2013, permettra de mettre en évidence les leviers sur lesquels s'appuie aujourd'hui la filière forêt-bois française. Sur ces bases, pourront être réfléchies les stratégies permettant d'accroître la capacité de la filière forêt-bois française à stocker du carbone en forêt ou à mobiliser des produits bois au sein de la filière favorisant les effets de substitution matériau et énergie ainsi que le stockage dans les produits bois.

I. Compartiments de comptabilisation carbone dans la filière forêt-bois : les coefficients et hypothèses issus de l'état de l'art

Une revue de la littérature scientifique internationale a été réalisée, visant à identifier les hypothèses et les coefficients de stockage et de substitution permettant le calcul du bilan carbone de la filière forêt-bois française, relatifs aux quatre compartiments identifiés précédemment : stockage (i) dans l'écosystème forestier et (ii) dans les produits bois ; substitution (iii) matériaux et (iv) énergie (Dhôte *et al.*, 2016). Trois états de l'art spécifiques ont été réalisés dont on trouvera les détails en annexe du présent rapport :

- le premier sur le stockage de carbone dans la biomasse forestière et le bois-mort ([Annexe 2](#)) ;
- le second sur le stockage de carbone dans les sols forestiers ([Annexe 3](#)) ;
- le troisième sur le stockage de carbone dans les produits bois et les coefficients de substitution permettant d'évaluer les émissions de GES évitées grâce au recours aux produits bois ([Annexe 4](#)).

De ces revues de littérature, nous extrayons des coefficients et hypothèses pouvant s'appliquer au contexte français.

I.1. Stockage de carbone dans l'écosystème forestier

Le stockage de carbone dans l'écosystème forestier résulte de la capacité de ce dernier à absorber du CO₂ de l'atmosphère et concerne la biomasse vivante, aérienne et souterraine, le

bois-mort et les sols forestiers. Un des enjeux de ce chapitre est d'évaluer l'importance de la dynamique du stockage de carbone dans les sols forestiers.

1.1.1. Biomasse forestière vivante

En France, dans le rapportage national de la Convention Cadre des Nations Unies pour le Changement Climatique (CCNUCC) de gaz à effet serre réalisé par le CITEPA, la conversion en stocks de carbone des volumes bois-mort tige, calculés par l'inventaire forestier national, utilise une série de coefficients permettant d'estimer les volumes de branches et menus bois (sections de bois inférieures à 7 cm de diamètre) et des racines, puis de convertir ces volumes en matière sèche et, enfin, en carbone. Les valeurs moyennes des coefficients de conversion volume inventorié-carbone du reportage national CITEPA ont été discutées et comparées aux valeurs homologues repérées dans la revue de littérature pour les autres pays forestiers (cf. Annexe 2).

Le Tableau 1.1 résume les différentes étapes de cette étude de variations. On arrive ainsi à des coefficients intégrés permettant la conversion du volume bois-mort tige IFN en masse de carbone ou de CO₂. Les valeurs centrales sont, respectivement pour les résineux et les feuillus, de 1,18 et 1,91 tCO₂/m³ de volume bois-mort tige IFN en France (ligne 8, Tableau 1.1). La gamme d'incertitude que nous retenons, autour de ces valeurs centrales, est de ± 15-20 % pour les feuillus, ± 20-25 % pour les résineux. Si nous considérons maintenant le seul coefficient d'expansion pour les branches, il est estimé à 1,30 pour les résineux et à 1,56 pour les feuillus avec une gamme d'incertitude de ± 4 % (ligne 4, Tableau 1.1 et Annexe 2, pp. 11-12).

Tableau 1.1 : Gamme de variation des coefficients de transformation des volumes bois mort tige (IGN) en volumes aérien total en C et en CO₂ - France- État actuel en gras

Gammes de valeurs	Résineux			Feuillus		
	Basse	Centrale	Haute	Basse	Centrale	Haute
Concentration en carbone	0,45	0,475	0,50	0,45	0,475	0,50
Infradensité (t/m ³)	0,36	0,40	0,44	0,52	0,55	0,58
BEF (root)	1,20	1,30	1,30	1,20	1,28	1,30
BEF (branch)-Colin (2014)	1,25	1,30	1,35	1,50	1,56	1,60
BEF (branch) CARBOFOR		1,34			1,61	
Coefficients intégrés (en t/) pour :						
<i>C par m³ vbftige IGN</i>	0,24	0,32	0,39	0,42	0,52	0,60
<i>CO₂ par m³ vbftige IGN</i>	0,89	1,18	1,42	1,55	1,91	2,21
<i>C par m³ VAT</i>	0,19	0,25	0,29	0,28	0,33	0,38
<i>CO₂ par m³ VAT</i>	0,71	0,91	1,05	1,03	1,23	1,38

1.1.2. Bois-mort

L'IGN réalise, depuis plusieurs années et dans le cadre de son protocole de mesures standard sur chaque placette, un relevé du bois-mort (en séparant bois-mort sur pied et au sol). Cette information peut être utilisée dans un système de projection, si l'on sait simultanément estimer les entrées de bois-mort (mortalité annuelle, rémanents d'exploitation provoqués par les coupes) et les sorties (décomposition du bois-mort). La recherche bibliographique a été orientée pour renseigner la vitesse de décomposition annuelle du bois-mort.

Dans Dhôte *et al.* (2016), les stocks initiaux de bois-mort mesurés par l'IGN ne différenciaient ni les bois feuillus et résineux (pour le bois-mort au sol et sur pied de diamètre supérieur à

7 cm), ni les volumes de bois-mort au sol de moins de 7 cm de diamètre. Dans la présente étude, ces différents compartiments de bois-mort ont été différenciés et leurs stocks initiaux ont été évalués (cf. [Tableau 1.2](#)). Dans les mesures IGN, seul est estimé le bois-mort se décomposant en forêt. Les chablis ne présentant plus aucune trace de vie sont inclus dans l'estimation du bois-mort au sol. Les autres chablis restent des arbres vivants.

Tableau 1.2 : Stocks initiaux bois-mort pris en compte dans le calcul du bilan C de la filière sur la période 2015-2050, en MtCO₂eq (source IGN)

Stock de bois mort	Au sol	Sur pied	TOTAL
< 7 cm	63,3		63,3
Gros bois feuillus	103,5	78,4	181,9
Gros bois résineux	63,7	34,5	98,2
TOTAL	230,5	112,9	343,4

Nous avons supposé que les entrées dans le compartiment bois-mort étaient constituées du volume total aérien des arbres au moment de leur mort (les chutes de branches en cours de vie et les apports de souches sont donc considérées comme entrées directes dans le système-sol), et que la vitesse de déstockage du carbone dans le bois-mort suivait une dynamique exponentielle, avec un paramètre de disparition exprimé sous forme d'une demi-vie. Ici, les demi-vies ont été fixées respectivement à 30 ans pour les gros bois-mort feuillus, 10 ans pour les gros bois-mort résineux, et 5 ans pour le bois-mort issus des menus bois. Ceci signifie qu'en moyenne, sur toutes les forêts françaises de métropole, la moitié du carbone stocké dans une pièce de bois-mort abandonnée en forêt y est encore présente après 30, 10 ou 5 ans selon la catégorie de bois-mort que nous avons considérée. Le choix d'une demi-vie longue réduit le coefficient de sortie annuelle (ici, la vitesse de dégradation) et augmente le stock moyen. Notons que le stockage annuel dans le compartiment bois-mort dépend fortement de la durée de demi-vie, et que les valeurs que nous avons choisies sont cohérentes avec les résultats de la méta-analyse de Zell *et al.* (2009).

1.1.3. Sols forestiers

La question du stockage de carbone dans les sols est devenue cruciale avec la mise en place de l'initiative internationale dite « 4 pour 1000, les sols pour la sécurité alimentaire et le climat », objectif d'augmentation annuelle du stockage de carbone dans tous les sols du monde (Dignac *et al.*, 2017 ; Meermans *et al.*, 2016). Or, la plupart des évaluations du stockage de carbone en forêt ne prennent pas en compte les sols forestiers. Dans la mesure du possible, nous avons tenté de les intégrer dans l'estimation du bilan carbone de la filière, en nous appuyant sur un état de l'art international sur la question. Parallèlement, les données concernant les valeurs moyennes de stockage de carbone dans les sols forestiers obtenues sur le réseau français RENECOFOR, qui indiquent une augmentation du carbone des sols entre les deux campagnes d'observation espacées de 15 ans, sont ici prises en compte (cf. [Annexe 3](#)).

Nous avons estimé que le stock initial de carbone dans les sols forestiers jusqu'à 1 m de profondeur, correspondant aux dernières estimations disponibles, était de 344 tCO₂eq/ha, soit un stock global de 5 520 MtCO₂eq. Sur cette base, nous avons considéré que les sols forestiers français se comportaient en moyenne comme des puits de carbone, en lien avec les usages anciens dont ils portent les marques (Dupouey *et al.*, 2002). La vitesse de stockage observée au cours des 15 dernières années dans le réseau RENECOFOR est 0,19 tC/ha/an sous feuillus et 0,49 tC/ha/an sous résineux, soit 0,73 tCO₂eq/ha/an sous feuillus et 1,80

tCO₂eq/ha/an sous résineux (Jonard *et al.*, 2017). Si nous extrapolons ces valeurs observées dans le réseau RENECOFOR à l'ensemble des forêts françaises de production, selon leur répartition par groupes d'essences (feuillus, résineux, mélange), nous obtenons une estimation du stockage dans les sols forestiers de 15 MtCO₂eq/an pour l'ensemble du territoire français métropolitain.

Il faut insister sur le fait que le réseau RENECOFOR (composante française de l'observatoire européen ICP-Forest de niveau II) n'a pas été conçu pour être représentatif des forêts françaises dans leur ensemble. Il s'agit d'une collection de 102 peuplements sélectionnés en forêt publique (domaniale ou communale), présentant des faciès sylvicoles moyens (parmi la gamme de ce qu'on peut trouver en forêt) et ce, pour 11 essences principales. Ils se distinguent *a priori* de la « forêt française moyenne » par plusieurs caractéristiques (propriété, historique d'usage du sol et de gestion sylvicole, composition spécifique). Dans l'état actuel de notre compréhension des phénomènes d'accumulation du carbone dans les sols forestiers, observés dans plusieurs études européennes récentes, il reste difficile d'établir si l'extrapolation RENECOFOR à l'ensemble de la France métropolitaine est justifiée, et ce qu'il faudrait faire pour qu'elle le soit. Pour rester en cohérence avec Dhôte *et al.*, (2016), nous considérerons dans cette étude comme valeur moyenne nationale un peu moins de la moitié de la valeur extrapolée à partir des observations sur RENECOFOR, soit 7,25 MtCO₂eq/an, et nous supposerons que cette vitesse devrait diminuer dans le futur (dynamique bornée et convergeant exponentiellement, impact du réchauffement et de la gestion sur la vitesse des processus, impacts des changements d'usages passés (augmentation de la surface forestière) et actuels (changement des essences)) jusqu'à 6 MtCO₂eq/an au-delà de 2030.

Les différentes hypothèses et coefficients pris en compte pour les bilans carbone de la filière forêt-bois française réalisés dans cette étude sont résumés dans le [Tableau 1.3](#) ci-dessous.

**Tableau 1.3 – Coefficients et hypothèses de calcul
pour l'estimation du stockage de carbone dans l'écosystème forestier**

Variables et Coefficients		Sources
Biomasse forestière	Variabes : Production biologique brute ; Récolte ; Pertes d'exploitation ; Mortalité	Données issues de l'outil de modélisation MARGOT de l'IGN. <i>Evaluations sur la période 2015-2050 selon les différents scénarios élaborés, à ces mêmes horizons (cf. Chapitre II, III et IV)</i>
	Taux de décomposition annuel (bois feuillus)	2,3% (30 ans)*
Bois-mort	Taux de décomposition annuel (bois résineux)	6,9% (10 ans)*
	Taux de décomposition annuel (pertes d'exploitation)	13,9% (5 ans)*
	*demi-vies associées	Zell et al., (2009) <i>Différenciation entre feuillus, et résineux et pertes</i>
	Stocks initiaux	Feuillus 181,9 MtCO ₂ eq Résineux 98,1 MtCO ₂ eq Pertes (<7cm) 63,3 MtCO ₂ eq source IGN <i>Différenciation entre les stocks de gros bois feuillus et ceux de gros bois résineux et menus bois (diamètres inférieurs à 7cm)</i>
Sols	Stockage annuel (feuillus)	7,25 MtCO ₂ eq/an jusqu'à 2030, puis 6 MtCO ₂ eq/an
	Stockage annuel (résineux)	6 MtCO ₂ eq/an
	Stock initial	5520 MtCO ₂ Réseau RENECOFOR

I.2. Stockage dans les produits bois ou à base de bois au sein de la filière

L'usage qui est fait du bois et la durée de vie des produits pérennes qui en sont issus constituent les variables clés du stockage du carbone dans les produits bois. La littérature internationale consultée sur l'estimation des stocks de carbone dans les produits bois a permis de faire un point sur les durées de demi-vie de ces stocks de carbone dans les produits, ainsi que sur la dynamique de dévolution des stocks dans la filière, en contributions absolues et relatives, et en distinguant éventuellement des sous-filières jugées pertinentes (cf. Annexe 4, pp. 1-4).

En vue d'estimer le stockage annuel de carbone dans les produits bois, deux systèmes dynamiques indépendants, pour le bois d'œuvre (BO) et le bois d'industrie (BI), ont été considérés, sans échange avec l'extérieur du territoire métropolitain. Ces systèmes sont alimentés chaque année par les prélèvements de produits et se vident selon une loi exponentielle telle que la durée de demi-vie des produits est de 20 ans pour le BO ou de 5 ans pour le BI. Ces 2 systèmes ont été en outre supposés à l'équilibre au début de la période d'évaluation, c'est-à-dire que les entrées de produits sont considérées comme compensant très exactement les sorties et que le stockage annuel est nul la première année de la période étudiée.

Tableau 1.4 : Coefficients et hypothèses de calcul pour l'estimation du stockage de C dans les produits bois

Variables et Coefficients		Sources	
Stockage dans les produits bois	Variables: Disponibilités / récoltes produits	Données issues de l'outil de modélisation MARGOT de l'IGN (période 2015-2050) Ventilation de la récolte issue des projections du modèle économique FFSM (cf. Annexe 14)	
	BO Taux décomposition annuel BO	3,4 % (20 ans)*	Madignier <i>et al.</i> , 2014 Dires d'experts
	Stock initial 2016	300 MtCO ₂ eq	source IGN
	BI Taux décomposition annuel BI	13,9 % (5 ans)*	Madignier <i>et al.</i> , 2014 Dires d'experts
	*demi-vies associées Stock initial 2016	80 MtCO ₂ eq	source IGN

La combinaison de ces hypothèses conduit à estimer des stocks actuels (2016) de 300 et 80 MtCO₂eq respectivement pour le BO et le BI. À titre de comparaison, l'étude CARBOSTOCK réalisée par le FCBA sur des données 2005 estimait le stock de produits-bois à 313 MtCO₂ eq (FCBA, 2008, 2012).

I.3. Les effets de substitution

Les effets de substitution résultent de l'usage du bois en remplacement d'énergies ou de matériaux concurrents, non renouvelables et présentant des bilans carbone moins favorables. Par construction, les phénomènes de substitution, centraux pour comprendre le rôle de la forêt et de ses produits dans l'atténuation du changement climatique, ne sont pas attribués à la forêt dans l'approche de rapportage retenue pour les bilans de émissions par secteurs d'activité de la CCNUCC. Leur évaluation est néanmoins délicate, car elle suppose de comparer des filières complètes de production, au périmètre strictement identique qui, selon les principes de l'analyse de cycle de vie (ACV), vont jusqu'à la fin de vie du produit ou du service rendu : les coefficients de substitution dépendent ainsi du contexte industriel national et des options d'usage qui y sont pratiquées.

Ils sont en outre susceptibles d'évoluer dans le temps avec la stratégie des entreprises (amélioration des procédés et bassins d'approvisionnement), les habitudes de consommation et les modifications qui pourraient intervenir dans les usages finaux des produits bois. Il existe deux grands types de substitution :

- **La substitution-énergie** correspond à la quantité d'émissions de CO₂ économisées par l'usage de bois-énergie en remplacement d'énergies de référence (fuel, gaz, charbon, mix électrique ou énergétique national) (Katers *et al.*, 2012 ; Oliver *et al.*, 2014) ;
- **La substitution-matériau** correspond à la quantité d'émissions de CO₂ évitées par le recours à un produit-bois plutôt qu'à un produit de référence (béton, acier, plâtre, aluminium). L'usage du bois, en alternative à des matériaux et filières concurrents, permet d'éviter d'importantes émissions de CO₂ (Eriksson *et al.*, 2012).

L'état de l'art a permis de fournir des éléments généraux sur l'estimation des coefficients de substitution (méthodes employées, hypothèses de calcul, valeurs obtenues) dans différents pays (cf. Annexe 4, pp. 4-17). La nature et l'efficacité des procédés de transformation ont été examinés dans l'état de l'art et pris en compte dans le choix des coefficients de substitution

applicables au contexte national français. Cette substitution reste aujourd'hui difficile à quantifier puisque, pour déterminer avec précision les émissions de GES évitées, il est nécessaire d'estimer correctement les émissions de GES selon les deux options alternatives et le long de toute la chaîne de production et d'usage.

1.3.1. Substitution bois-matériaux

L'identification, dans la littérature internationale, des coefficients de substitution matériaux pertinents dans le contexte français a été basée sur la méta-analyse de Sathre et O'Connor (2010), en ne retenant que 28 des 36 études qui y sont considérées : 6 études comparant la construction-bois à la construction métallique ont été écartées ainsi que 2 études proposant des valeurs anormalement élevées. En revanche, nous avons conservé les valeurs des études comparant des fabrications d'utilités en bois plutôt qu'en métal, comme les pylônes de lignes électriques (cf. Annexe 4, p. 16).

Tableau 1.5 – Coefficients et hypothèses de calcul pour l'estimation des effets de substitution bois-matériau et bois-énergie.

Variables et Coefficients		Sources
Variables: Disponibilités / récoltes produits		Données issues de l'outil de modélisation MARGOT de l'IGN. (période 2015-2050) Ventilation de la récolte issue des projections du modèle économique FFSM (cf. Annexe 14)
Effets de Substitution	Coefficient de substitution BO BI	1,6 tCO₂/m³ Gamme de variation : 0,59-3,47 Sathre & O'Connor, 2010
	Coefficient de substitution BE	0,5 tCO₂/m³ Gamme de variation : 0,37- 0,64 Oliver <i>et al.</i> , 2014
	Rendements de transformation BO/BI/BE (hypothèse de technologie constante aux horizons étudiés)	Données issues du modèle FFSM (modèle économique de la filière) (cf. Annexe 14)

Les coefficients de substitution moyens tirés de l'étude de Sathre et O'Connor (2010) et exprimés en tC/tC, ont été convertis en tCO₂/m³ de produit en considérant 3 niveaux de densité et 3 niveaux de teneur en carbone dans les bois, issus de la littérature. Comme le secteur de la construction utilise massivement des résineux, nous avons considéré la gamme de densité correspondante issue de l'état de l'art international, soit 0,36 à 0,44 t/m³. Exprimé en tCO₂/m³ de produit, le coefficient de substitution-matériau varie donc entre 0,59 et 3,47, avec une valeur centrale à 1,6 (cf. Tableau 1.5). La plage de variation du coefficient de substitution bois-matériau est ainsi conséquente, signalant une incertitude marquée quant à la valeur (ou aux valeurs) qui pourrai(en)t lui (leur) être attribuée(s). Cette variabilité peut avoir plusieurs sources liées (i) aux incertitudes de mesure inhérentes aux méthodes d'analyse retenues dans ce type d'approche, (ii) à la diversité des produits bois susceptibles d'être consommés et (iii) aux performances différenciées des technologies à mettre en œuvre pour les produire par rapport à leurs produits concurrents.

1.3.2. Substitution bois-énergie

Une autre option d'usage du bois à des fins de substitution est de le brûler en substitution aux énergies fossiles. Pour l'estimation des coefficients de substitution-énergie, nous nous

sommes appuyés sur le travail de [Oliver et al. \(2014\)](#) : émissions évitées par la combustion du bois en substitution du gaz, du fuel et du charbon. Nous avons considéré qu'en France, nous consommerions essentiellement du bois de feuillus dans des maisons individuelles ou des chaufferies collectives déjà pourvues de chaudière et que le bois remplacerait du fuel à 80 % et du gaz à 20 % (pas d'électricité remplacée) (cf. [Annexe 4, p. 17](#)). Dans ce cadre, nous avons appliqué un mix fuel-gaz à 80-20 % aux 3 niveaux retenus pour la densité des bois feuillus (cf. [Annexe 2, pp. 10-12](#)). Exprimé en tCO_2/m^3 , le coefficient de substitution-énergie varie donc entre 0,37 et 0,64, avec une valeur centrale à 0,5 (cf. [Tableau 1.5](#)).

1.3.3. Commentaires sur la signification des coefficients et leurs évolutions possibles

Pour l'usage en matériau, nous avons repris et adapté à nos besoins les résultats de [Sathre et O'Connor \(2010\)](#) : dans cette étude, les émissions évitées par l'usage du bois reposent, d'une part, sur la meilleure performance énergétique associée à la mise en œuvre du bois (par comparaison avec ses concurrents) et, d'autre part, sur le fait que les co-produits (ainsi que les produits en fin de vie, dans certains cas) sont valorisés en énergie. Il s'ensuit que les coefficients de [Sathre et O'Connor](#) combinent, sous l'appellation de « substitution-matériau », des bénéfices de substitution que d'autres études répartiraient entre matériau et énergie. Nous n'avons pas cherché à faire une telle séparation, pour deux raisons : d'une part, les 36 études compilées et analysées par [Sathre et O'Connor](#) sont hétérogènes et inégalement exhaustives dans leur délimitation des processus industriels pris en compte (une subdivision du jeu de données, en deçà d'un effectif de 30, augmenterait encore l'incertitude sur les résultats) ; d'autre part, sur le plan des applications, il existe des différences, qui font débat, entre la ressource en bois-énergie qu'on mobilise à partir des co-produits et des bois en fin de vie et la biomasse fraîche qu'on valorise directement en énergie à la sortie de la forêt.

Découlant de ce choix, la quantité de bois-énergie issue des co-produits a été ajoutée à la biomasse directement issue de forêt pour estimer la fourniture d'énergie, mais seule la seconde a été utilisée comme base pour calculer les émissions évitées par substitution-énergie (afin d'éviter un double compte). Une conséquence de ces choix est que la contribution relative des effets de substitution matériau vs énergie est plus nettement à l'avantage des premiers dans notre étude que dans d'autres travaux ayant adopté d'autres conventions comptables. Notre choix se défend, en particulier si l'on tient compte du caractère contraint d'une grande partie des ressources en bois-énergie (la disponibilité des pellets découle directement de l'activité des scieries, la disponibilité en bois-bûche des houppiers feuillus suppose un marché solvable pour la grume, etc.).

Dans les simulations à l'horizon 2050 présentées plus loin, nous avons supposé que les coefficients de substitution resteraient stationnaires à cet horizon. Cette hypothèse forte a été faite faute de pouvoir établir une projection comparée des filières basées sur le bois et de leurs concurrentes, ainsi que des mix électriques et énergétiques dans leur ensemble. Une telle opération relève de la prospective technologique qui nécessite de recourir à de multiples hypothèses et scénarios spécifiques, démarche qui n'a pu être menée dans le cadre de cette étude. En effet, les coefficients de substitution seront amenés à évoluer sous l'effet de trois composantes : la composition des produits-bois consommés dont les coefficients de substitution peuvent se différencier plus nettement que ce qui est retenu ici ; l'évolution des technologies de transformation du bois et de leurs caractéristiques énergétiques ; et, l'évolution des technologies de production des produits concurrents et de leurs caractéristiques en matière d'émissions de GES. Certains arguments suggèrent que les industries du béton ou des métaux pourraient chercher à verdir leurs procédés (par exemple,

en substituant les énergies dans leurs procédés) ; *a contrario*, les nouvelles frontières de durabilité rencontrées par ces filières devraient renchérir leurs coûts énergétiques (disponibilité du sable, par exemple). Il est alors difficile de trancher et ce d'autant plus qu'il serait également opportun de pouvoir faire varier ces évolutions des coefficients de substitution selon les scénarios climatiques (RCP).

II. Bilan carbone de la filière forêt-bois française et les facteurs influençant son évolution

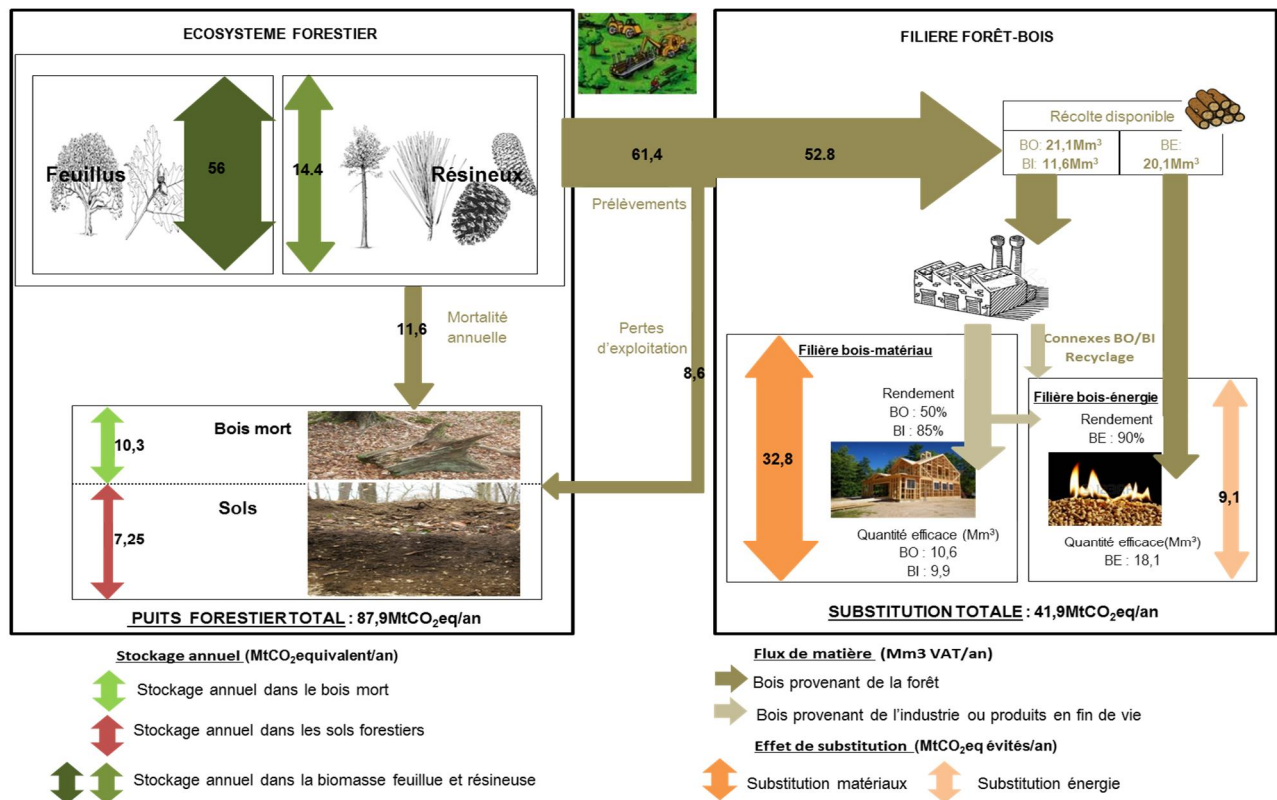
II.1. Les composantes du bilan carbone de la forêt française en 2013

Grâce aux coefficients et hypothèses identifiés dans la littérature scientifique, nous avons établi le bilan carbone de la filière forêt-bois française dans son état actuel, au regard des 4 leviers retenus pour l'atténuation des émissions de CO₂. Il n'a pas été tenté de rapprocher les calculs suivants de la comptabilité nationale réalisée par le CITEPA, dans la mesure où les conventions comptables peuvent différer et où nous sommes davantage intéressés par les ordres de grandeur des différentes contributions au bilan de carbone, ainsi que leur réaction aux différents scénarios de gestion/mobilisation.

La [Figure 1.1](#) propose une représentation de la filière forêt-bois française mettant en avant ses flux de matière entre les différents stades de la filière (en Mm³/an) et les flux annuels de CO₂ relatifs aux leviers identifiés dans l'étude (en MtCO₂eq/an). Elle s'appuie sur les coefficients de stockage et de substitution et les hypothèses présentées ci-dessus avec les valeurs centrales des plages de variation des coefficients.

Le stockage dans l'écosystème forestier (« puits » forestier total) et dans les produits bois (non représenté ici car considéré, par définition, comme étant égal à zéro la première année de la période étudiée), ainsi que les effets de substitution par les filières aval (substitution totale) ont ainsi été estimés. Sous cet ensemble d'hypothèses, le bilan carbone de la filière forêt-bois française peut être évalué en sommant les effets de stockage annuel de carbone dans l'écosystème forestier et dans les produits bois et les équivalents CO₂ des émissions de GES évitées par effets de substitution (matériau et énergie), à environ 130 MtCO₂ eq/an.

Du fait de l'écart important entre accroissement et prélèvement, ce bilan est actuellement dominé par le stockage annuel de carbone dans l'écosystème forestier, constituant un puits forestier national de carbone massif, estimé à 88 MtCO₂eq/an. Dans cet ensemble, le stockage de carbone dans la biomasse aérienne feuillue est largement prépondérant (56 MtCO₂eq/an) alors que le stockage dans la biomasse aérienne résineuse est en ordre de grandeur proche des stockages dans le bois-mort et les sols (respectivement 14, 10 et 7 MtCO₂eq/an. Le carbone dans les produits bois est aujourd'hui supposé égal à zéro, signifiant que le carbone stocké dans les productions de l'année correspond au déstockage de carbone lié à la fin de vie et à la destruction des produits bois antérieurs. Ainsi, l'effet favorable actuel des usages du bois dans la filière repose uniquement sur les effets de substitution : parmi ceux-ci, l'effet majeur revient à la substitution bois-matériau qui, avec 33 MtCO₂ eq/an et même en tenant compte de la grande plage de variabilité du coefficient de substitution, apparaît comme un important levier d'atténuation du changement climatique en permettant d'éviter les émissions de GES issus des produits concurrents. La substitution liée au bois utilisé directement comme énergie en dépit des importants volumes mobilisés (20 Mm³/an, soit 40 % de la récolte) n'est finalement aujourd'hui responsable que d'un apport faible au bilan carbone de la forêt française, soit 9 MtCO₂ eq/an.



* La variation de stock de carbone dans les produits bois a été estimée à 0 et -0,1 MtCO₂eq/an pour BO et BI respectivement et n'apparaît donc pas dans les flux de CO₂ de la filière en 2013

Figure 1.1 – Flux de matière et de CO₂ aux différents stades de la filière forêt-bois française en 2013

(VAT = Volume aérien total, BO = Bois d'œuvre, BI = Bois d'industrie, BE = Bois énergie)

Outre les hypothèses et coefficients commentés plus haut, deux conventions importantes ont été nécessaires pour établir le bilan exposé à la figure 1.1. Les usages en bois d'œuvre et bois d'industrie sont alimentés depuis la forêt avec un rendement estimé ici à 50 % (BO) et 85 % (BI). Ces coefficients n'incluent pas les pertes d'exploitation, qui font l'objet d'une estimation directe avec un taux important (14 % du volume prélevé) recouvrant l'ensemble des bris, mortalités induites et fraction de la ressource perdue en forêt. En revanche, les rendements incluent les pertes de matière le long de la chaîne de transport et transformation, ainsi que l'allocation d'une partie du bois d'industrie à la papeterie. La seconde convention a consisté à considérer le commerce extérieur comme neutre sur le plan du bilan de carbone : nous n'avons pas déduit du bilan le volume des grumes récoltées et exportées, et nous n'avons pas incorporé les produits forestiers importés rentrant dans la seconde transformation ; nous avons supposé que le solde des émissions associées à ces deux flux était relativement faible. Ces deux conventions mériteraient bien sûr d'être mises à l'épreuve. Nous estimons qu'une telle étude de sensibilité prendrait tout son sens dans le cadre d'une modélisation exhaustive des flux et stocks dans les différentes voies de transformation de la filière, pour laquelle les outils font pour l'instant défaut.

II.2. Les facteurs qui pourraient faire évoluer ce bilan carbone de la filière à l'horizon 2050

Au vu des rôles respectifs des différents leviers dans le bilan carbone actuel de la filière forêt-bois française, il est clair que les orientations à venir de sa gestion forestière vont influencer directement ce bilan carbone *via*, d'une part, leur impact sur la dynamique des peuplements

et leur capacité à stocker ou à relarguer du carbone et, d'autre part, la capacité de la filière à mettre en marché des produits à fort taux de substitution par rapport aux filières concurrentes aux procédés plus émetteurs de GES. Le maintien des niveaux actuels de récolte dans un contexte de croissance du stock sur pied permettrait un stockage accru de carbone en forêt (au moins tant que ces peuplements, plutôt jeunes, seraient en croissance forte) mais limiterait d'autant les effets de substitution attendus du développement des usages. Cette stratégie de limitation des prélèvements pourrait cependant se traduire par une plus grande sensibilité aux aléas climatiques et aux crises diverses dont pourrait être victime la forêt française. Inversement, une récolte plus soutenue associée à une transformation adéquate des peuplements permettant d'en accroître la productivité freinerait, au moins temporairement, la progression du stock de carbone en forêt, mais favoriserait les effets de substitution en aval, et ce d'autant plus si le bois est utilisé en tant que matériau.

Ces différentes orientations de gestion ont également des conséquences contrastées quant à la démographie des ressources : les taux de mortalité, recrutement et croissance vont réagir à l'intensité des phénomènes de compétition. En outre, l'évolution de la composition en espèces et la performance des nouvelles populations et variétés installées impacteront la force du puits de carbone. À l'horizon 2050, la variation des coefficients démographiques a en principe le plus d'impact, alors que les modalités du renouvellement jouent plus fortement pendant les décennies suivantes (adaptabilité des ressources génétiques, capacité des peuplements en place à fournir les performances sous contrainte climatique croissante).

Compte tenu de l'importance relative des effets de substitution, notamment en matériau, le bilan de carbone d'ici 2050 va dépendre de scénarios d'évolution qui concernent à la fois les industries de la filière forêt-bois (mix-produit, rendement des différentes voies de transformation, taux de recyclage et devenir des produits en fin de vie), mais également de la place relative qu'elles vont occuper dans le système productif et leurs performances comparées avec les industries concurrentes. Outre les effets de dilution (l'avantage comparatif devrait se réduire quand on passe de 5 à 25 % de part de marché), on peut imaginer des phénomènes de spécialisation induits par la rareté (réserver l'usage du béton, des métaux et du bois à des situations dans lesquelles ils maximisent leurs performances). On ne peut pas éluder l'impact, sur l'évaluation de ces performances relatives des différents matériaux, des caractéristiques des mix énergétiques et électriques nationaux. Ainsi, 11 des 21 articles compilés par Sathre et O'Connor (2010) concernent la Suède, la Norvège, la Finlande et la Suisse, des pays qui ont des mix énergétiques proches de la France, tandis que les autres références concernent des pays très émetteurs de GES comme les USA. Les trajectoires de ces systèmes d'ici 2050 sont entachées d'aléas et d'incertitudes, comme le montre la difficulté de l'Allemagne à tenir son objectif 2020 (Beeker, 2017)

Au-delà des effets centraux que les options de gestion forestière pourraient avoir sur le bilan carbone de la forêt française, plusieurs facteurs de perturbation essentiels tels que l'évolution du climat ou les événements extrêmes pourraient dégrader fortement le stockage de carbone dans l'écosystème forestier et modifier drastiquement le bilan carbone de la filière. Ainsi, contrairement à nombre de travaux menés jusqu'ici, on tentera de prendre en compte ici les conséquences du changement climatique sur les peuplements forestiers et sur l'évolution de la ressource dans le bilan des émissions de CO₂ de la filière forêt-bois au cours des décennies à venir. De la même façon, certains événements extrêmes (sécheresse, incendies, tempêtes) ou des crises telles que des invasions biologiques sévères touchant tout ou partie des peuplements forestiers, susceptibles de bouleverser gravement la force du puits forestier national sont à considérer. La fréquence et l'intensité de certains de ces aléas biotiques et

abiotiques pourraient en outre augmenter sous l'effet des dérèglements climatiques et les dommages forestiers s'aggraver en conséquence.

C'est ici tout l'enjeu des scénarios de gestion, des options climatiques et des scénarios que nous avons élaborés pour cette étude. Mais les outils à disposition pour analyser les évolutions à des horizons éloignés (2050) du bilan carbone de la forêt française permettent difficilement de prendre en compte l'ensemble de ces phénomènes. Ainsi, Colin (2014) pp. 12-15 rappelle que le modèle MARGOT utilisé par l'IGN dans nombre d'études « est un modèle démographique simulant l'évolution de la ressource moyenne d'un territoire (allant de la région au pays) en fonction de la croissance des arbres, de la mortalité naturelle et des prélèvements de bois. Il est basé sur les observations statistiques collectées sur les placettes de l'inventaire forestier national (IFN). L'IGN utilise classiquement ce modèle pour l'étude des ressources forestières et l'évaluation des disponibilités en bois. Ce type de modèle est particulièrement robuste pour projeter à court et moyen terme les états de systèmes à forte inertie comme la forêt française, car ils s'appuient sur des grands nombres d'observations sur le terrain. Le modèle par classe de diamètre de l'IGN est appliqué à l'ensemble des forêts, à l'exception des peupleraies cultivées équiennes ».

Une des limites du modèle MARGOT est sa difficulté à simuler correctement des évolutions extrêmes et rapides (comme, par exemple, sécheresse ou dépérissement massifs, tempête majeure) ou des inflexions plus lentes comme celles induites par une densification progressive des peuplements ou une accélération du changement climatique. En effet, les paramètres de la dynamique forestière (croissance, mortalité, etc.), basés sur des données historiquement observées, ne sont pas explicitement liés à ce type de facteurs modifiant fortement certains des mécanismes clés du système. Il y a donc lieu de faire évoluer certains paramètres à partir d'informations externes pouvant provenir d'autres modèles. De même, les modèles de ressource à large échelle spatiale tels que MARGOT livrent des projections sous hypothèses, et pas des prédictions opérationnelles. Ils permettent d'évaluer les conséquences qu'auraient différentes décisions politiques ou options de gestion à l'échelle des territoires. Pour cette raison, les modèles empiriques pour des projections à long terme où les effets des changements globaux ou l'accroissement de l'occurrence d'événements extrêmes deviennent majeurs doivent être utilisés avec précaution (Colin, 2014, p. 13). Le dispositif de simulation des évolutions possibles du système a donc été adapté aux objectifs et aux horizons choisis pour cette étude, en introduisant dans MARGOT des lois de densité-dépendance pour les paramètres de croissance et de recrutement. Par rapport à la version standard de MARGOT, cette modification confère aux simulations des comportements qualitativement plus satisfaisants, par exemple avec des propriétés de limitation-saturation qui évitent aux scénarios variables par le taux de prélèvement de diverger trop fortement. Compte tenu des limites méthodologiques exposées ci-dessus et du caractère exploratoire des lois densité-dépendantes, les résultats sont, comme toujours dans les études poussant au plus loin les limites d'usage des outils disponibles, à analyser avec précaution.

CHAPITRE II. Une démarche de modélisation permettant de prendre en compte plusieurs options de gestion forestière et les évolutions du climat pour un bilan carbone à horizon 2050.

Dans ce chapitre, nous décrivons les trois modèles utilisés pour la simulation du potentiel d'atténuation du changement climatique par la filière forêt-bois française à l'horizon 2050. Comme évoqué précédemment, différents facteurs interviennent dans l'évolution des bilans carbone de la filière et nécessitent d'être pris en compte pour des projections à long terme : (1) les effets de la gestion forestière sur la dynamique des peuplements ; (2) les effets du climat sur l'évolution des ressources ; (3) les effets des risques et crises abiotiques et biotiques, dont la fréquence est susceptible d'augmenter dans le futur.

Le **modèle de ressource de l'IGN, MARGOT** (*MATRIX model of forest Resource Growth and dynamics On the Territory scale*, cf. [Annexe 12](#)), mobilisé pour les projections de la ressource française (ex. stocks de bois sur pied, disponibilités, mortalités), est l'outil principal de simulation utilisé dans cette étude. Cependant, dans le contexte actuel de changement climatique rapide, la mobilisation du modèle MARGOT seul est difficilement compatible avec l'objectif de proposer des projections à moyen terme de la ressource dans divers scénarios, notamment de par sa difficulté à simuler correctement des évolutions extrêmes et rapides telles que les effets du climat ou de crises majeures affectant la ressource. En outre, il ne permet pas d'analyser les gains économiques à attendre ou non des options de gestion qui pourraient être développées. Par conséquent, nous avons choisi de mobiliser des modèles complémentaires au sein de l'étude.

Le **modèle à base de processus écophysologiques** développé à l'UMR ISPA de Bordeaux, **GO+** (cf. [Annexe 7, II.1](#)), a été mobilisé pour intégrer dans l'analyse les effets du changement climatique sur la productivité forestière.

Parallèlement, le **modèle économique FFSM** (*French Forest Sector Model*, cf. [Annexe 14](#)), développé par l'UMR LEF à Nancy, a été mobilisé notamment en vue de proposer une analyse économique des conséquences de certaines des options de gestion retenues.

L'articulation entre ces modèles a permis de simuler les effets, tant sur le bilan carbone que sur les grandes variables économiques, de différents scénarios de gestion forestière combinés à des hypothèses d'évolution climatique sur lesquels se rajouteront des scénarios de crise.

I. Le modèle de ressource forestière de l'IGN : projection de la ressource et des disponibilités brutes

Afin de simuler l'évolution de la forêt française et de calculer les disponibilités en bois, le modèle MARGOT répartit en « domaines d'étude » les 15,86 millions d'hectares de forêts disponibles pour la production de bois. Chacun d'eux fait l'objet d'une projection régie par des hypothèses spécifiques. Un domaine d'étude regroupe des peuplements comparables en termes d'essence, de propriété, de conditions de milieu et de sylviculture. Ainsi, tous les peuplements d'un même domaine peuvent se voir appliquer les mêmes hypothèses de croissance biologique, de mortalité, et de prélèvement, à conditions de développement données (classe d'âge ou de diamètre).

Forêts hors peupleraies

La ressource forestière nationale a été stratifiée en 116 domaines d'étude (cf. Annexe 12, p. 33) issus d'une combinaison à dire d'experts des quatre facteurs suivants déterminés à partir des données IFN :

1. Le type de couverture boisée, avec la distinction entre les forêts fermées et les forêts ouvertes¹. Les forêts fermées temporairement déboisées comme les coupes rases, ou les parcelles en régénération, restent des forêts fermées.
2. L'essence objectif pour le gestionnaire. Elle est définie à dire d'expert. Une vingtaine de groupes d'essences feuillues et résineuses sont distingués en raison des objectifs sylvicoles qui leur sont assignés et/ou de leur autécologie. Une essence est dite « objectif » quand sa présence est supposée orienter les opérations sylvicoles : c'est souvent l'essence de plus grand intérêt économique.
3. La catégorie de propriété, en distinguant les forêts domaniales, les forêts des collectivités et les forêts privées (sans distinction de taille).
4. Les régions biogéographiques forestières. Les 11 Grandes Régions Ecologiques (GRECO²) permettent de distinguer les types de sols, de reliefs et de climats en France, soit des facteurs stationnels qui ont un impact sur la productivité des peuplements forestiers (les GRECO sont représentées sur la carte ci-dessous).

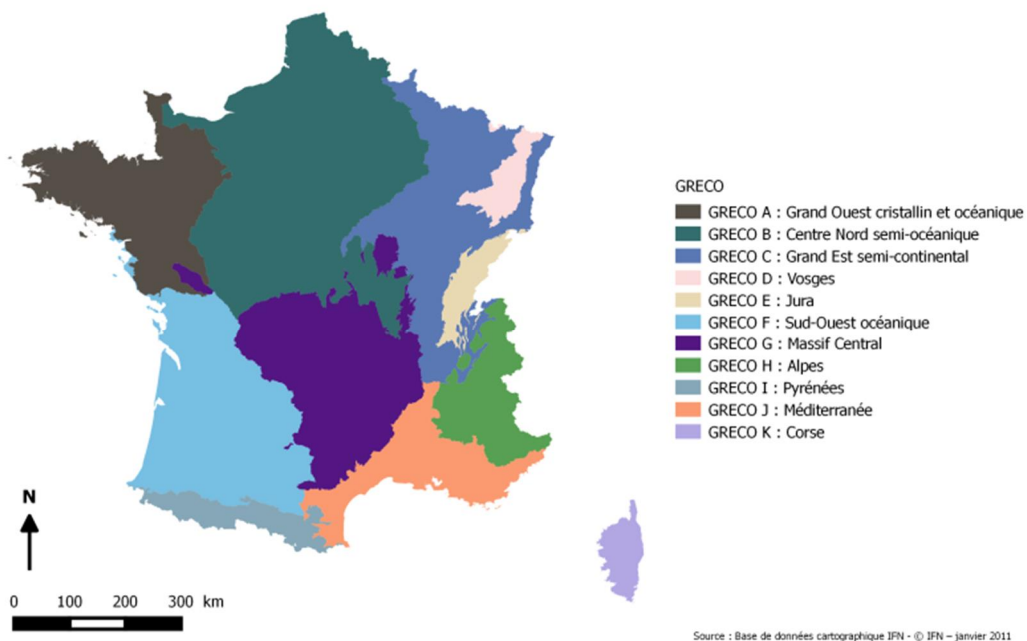


Figure 2.1 : Les 11 grandes régions écologiques (GRECO) forestières françaises

Chaque placette d'inventaire a été affectée à un domaine d'étude. Un domaine d'étude compte au moins 50 placettes différentes afin de décrire la ressource avec une précision statistique suffisante.

¹ Les forêts ouvertes sont des boisements lâches dont le couvert forestier est compris entre 10 et 40 % en raison d'un sol superficiel, de la présence de rochers ou du fait de facteurs climatiques limitants.

² IFN 2011. Une nouvelle partition écologique et forestière du territoire métropolitain : les sylvoécocorégions (SER). L'IF numéro 26, premier trimestre 2011. Edition IFN. ISSN : 1769-6755. 8p.

Les données IFN ont permis finalement de calculer :

Pour chaque domaine d'étude: surface et ressource en 2011 (nombre d'arbres et volume sur pied ventilés par classe de diamètre).

Pour chaque domaine d'étude : les paramètres de dynamique forestière sur la période 2005-2013, lesquels sont nécessaires pour simuler l'évolution de la ressource (production biologique, mortalité naturelle, et recrutement en effectif par classe de diamètre).

Cas particulier des peupleraies cultivées

Deux domaines d'études ont été constitués, distinguant deux grands bassins de production avec des conditions de croissance différentes : le Nord+(GRECO B, C, D et E) et le Sud et Ouest+(GRECO A, F, G, H, I et J). Ces deux domaines ont donc leurs propres paramètres de production et de mortalité.

I.1. Principe et fonctionnement : Simulateur de l'évolution de la ressource forestière

Les disponibilités en bois sont calculées avec un simulateur décrivant l'évolution de la ressource forestière française (Colin, 2014). Il est développé par l'IGN et le FCBA depuis les années 1980.

Le simulateur comprend deux modèles démographiques qui simulent la croissance, la mortalité et la sylviculture à l'échelle des domaines d'étude (cf. [Annexe 12, pp. 34-35](#)). Ils permettent ainsi d'estimer l'état futur de la ressource selon des pas de temps de 5 ans, et de simuler les prélèvements futurs en bois, ou disponibilités brutes.

La description de la ressource et la calibration des dynamiques de croissance et de mortalité naturelle sont réalisées exclusivement avec les mesures faites sur des placettes de l'IFN.

Les modèles sont génériques, c'est-à-dire qu'ils sont paramétrables et applicables quel que soit le type de peuplement (à l'inverse des modèles spécifiques qui ne peuvent être utilisés que pour une seule situation donnée et, le plus souvent, que pour une seule essence).

Le simulateur de l'évolution de la ressource comprend :

- 1) *Un modèle démographique de dynamique de la ressource par classe de diamètre mis en œuvre dans les forêts, à l'exception des peupleraies.*

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

Dans l'étude, la ressource forestière est décrite par un effectif d'arbres par classe de diamètre (amplitude de 5 cm, jusqu'à la classe 90 cm et plus), et un volume moyen correspondant. Les dynamiques forestières sont représentées pour chaque classe de diamètre par un taux de passage des arbres dans la classe de diamètre suivante (croissance), un taux de mortalité, un taux de prélèvement en effectif et un taux de recrutement dans la première classe de diamètre (Wernsdörfer *et al.*, 2012).

2) *Un modèle démographique de dynamique de la ressource par classe d'âge mis en œuvre dans les peupleraies cultivées.*

La description des peuplements par classe d'âge est particulièrement bien adaptée aux peuplements équiennes comme les plantations, c'est-à-dire là où les arbres ont le même âge et présentent des caractéristiques de croissance homogènes. Les interventions sylvicoles peuvent y être déclenchées en fonction de l'âge qui constitue alors un bon *proxy* du diamètre d'exploitabilité. Le renouvellement de ces peuplements s'effectue en général par coupe rase, directement ou progressivement. La modélisation par classe d'âge n'est pas applicable dans les peuplements trop hétérogènes en âge, diamètre ou essences, lesquels constituent la majeure partie de la ressource française.

La ressource forestière est décrite par une surface et un volume moyen à l'hectare par classe d'âge. Les dynamiques forestières sont représentées pour chaque classe d'âge par une production biologique à l'hectare, nette de la mortalité, un taux de prélèvement de la production en éclaircie, un taux de surface passée en coupe rase et une surface annuelle boisée ou reboisée.

I.2. Des modèles représentatifs de la forêt française et robustes en projection

Grâce au caractère systématique et national du dispositif d'inventaire de l'IGN, ces deux modèles construits avec les données IFN tiennent compte de la diversité des conditions de fertilité que l'on rencontre dans la forêt française. Ils prennent également en compte les perturbations de fond comme des chablis et les mortalités ordinaires. Ces modèles incluent aussi implicitement les comportements passés et actuels des gestionnaires, qui s'expriment au travers des essences rencontrées dans la ressource et des sylvicultures mises en œuvre.

En outre, les modèles sont ajustés sur un grand nombre d'observations de terrain. Or, plus il y a d'observations, plus la description de la ressource et la valeur de ses paramètres de dynamique sont précis.

Les modèles implémentés dans l'étude représentent donc bien la forêt française et son évolution récente. Dans le contexte de la temporalité forestière marquée par des évolutions lentes et progressives, ce type de modèle statistique est particulièrement robuste en projection à court et moyen terme.

III. Un modèle de filière (FFSM) pour une analyse économique des scénarios

Le modèle économique FFSM (*French Forest Sector Model*) a été mobilisé à des fins d'analyse économique, initialement pour déterminer les niveaux de prélèvements économiquement possibles dans les deux scénarios s'écarterant le plus des taux de prélèvement actuels et pour en estimer les gains et coûts associés. Comme on le verra plus loin, seul un des deux scénarios prévus a pu être réellement implémenté et, dans ce cas, FFSM a pu fournir les taux de prélèvements attendus et l'analyse économique correspondante. Dans l'autre cas, les difficultés du modèle à aller jusqu'au taux de prélèvement moyen prévu dans le scénario sont très instructives sur les conditions économiques auxquelles un tel scénario pourrait advenir.

Pour comprendre ces difficultés, il faut garder à l'esprit que FFSM est un modèle conçu principalement à des fins d'analyse théorique. Même si le modèle est, dans la mesure du possible, calibré en utilisant des données réelles, il représente des comportements

économiques théoriques et stylisés. D'une manière générale, un modèle comme FFSM est utilisé pour (1) mettre en évidence l'ordre de grandeur d'un phénomène, (2) mettre en évidence les déterminants économiques d'un phénomène et (3) analyser la sensibilité d'un mécanisme à la valeur d'un paramètre économique. Sa portée est donc plus nettement analytique que vraiment prédictive, contrairement à certains modèles économétriques. En particulier, le modèle permet de comparer la valeur des variables de sortie de nature économique (prix, quantités offertes, demandées, surplus) selon différents scénarios ainsi que les instruments de politiques publiques qu'il serait nécessaire de mettre en place pour orienter la dynamique des filières vers des trajectoires qu'elles ne suivraient pas « spontanément ». L'intérêt réside donc plus dans la comparaison des valeurs relatives des variables entre différents scénarios alternatifs que dans l'analyse de leurs valeurs absolues.

FFSM est un modèle récursif (avec un pas de temps annuel) et modulaire (cf. [Annexe 14, pp. 1-4](#)). Il est construit autour d'un module en équilibre partiel des marchés du bois, un module « ressource » décrivant la dynamique forestière et un module multi-agents décrivant la gestion des surfaces forestières auxquels s'ajoute un module de comptabilité carbone. Le fonctionnement général du modèle est décrit sur la [Figure 2.2](#). Il ne contient pas à ce stade de son développement de module spécifique dédié aux dynamiques d'investissement dans les filières de transformation.

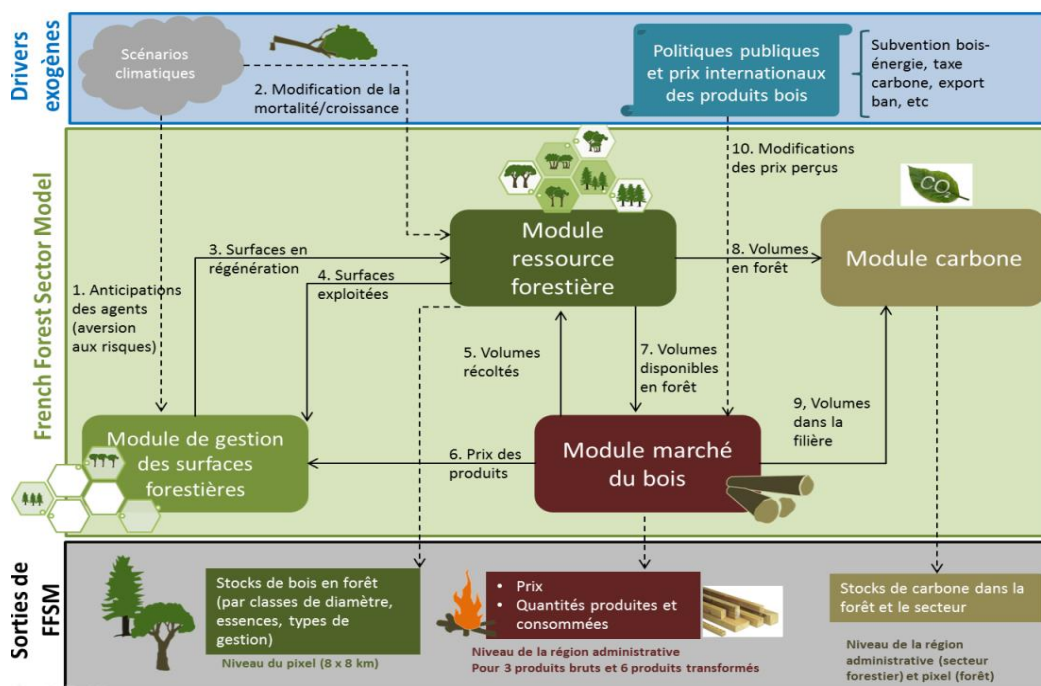


Figure 2.2 : Fonctionnement général du modèle FFSM et couplage de ses différents modules

FFSM s'appuie, tout d'abord sur un module de ressource spécifique qui représente la ressource forestière nationale désagrégée selon trois types de strates (régions, essences, types de gestion) et 13 classes de diamètre. Des paramètres de croissance et de mortalité sont définis de façon exogène pour chaque « domaine d'étude » résultant de cette désagrégation. En vue d'assurer la cohérence de l'étude, ces paramètres forestiers ont été ici calibrés afin d'être identiques à ceux utilisés dans le modèle MARGOT. Chaque année, le volume disponible en forêt est pris en compte dans le module de « marché » afin de déterminer l'offre de produits bois. Le lien se fait via une fonction d'offre de bois qui évolue

positivement avec la disponibilité en forêt. L'élasticité correspondante est positive et constante dans le modèle. Pour chaque type de produit offert, le modèle calcule une disponibilité différente selon une clé de répartition *ad hoc* des domaines d'étude.

Le module de marché (cf. Figure 2.3) est un modèle économique en équilibre partiel, représentant l'offre de 3 produits « bruts » (bois d'œuvre feuillus, bois d'œuvre résineux, bois industrie/bois énergie) et la demande de 6 produits transformés (sciages feuillus, sciages résineux, placages, panneaux, pâte et bois énergie) pour chaque région administrative française. Un produit « brut » est transformé en produit « transformé » à travers une fonction de production de type Léontief (coefficients input-output fixes) qui représente explicitement les coûts de transformation.

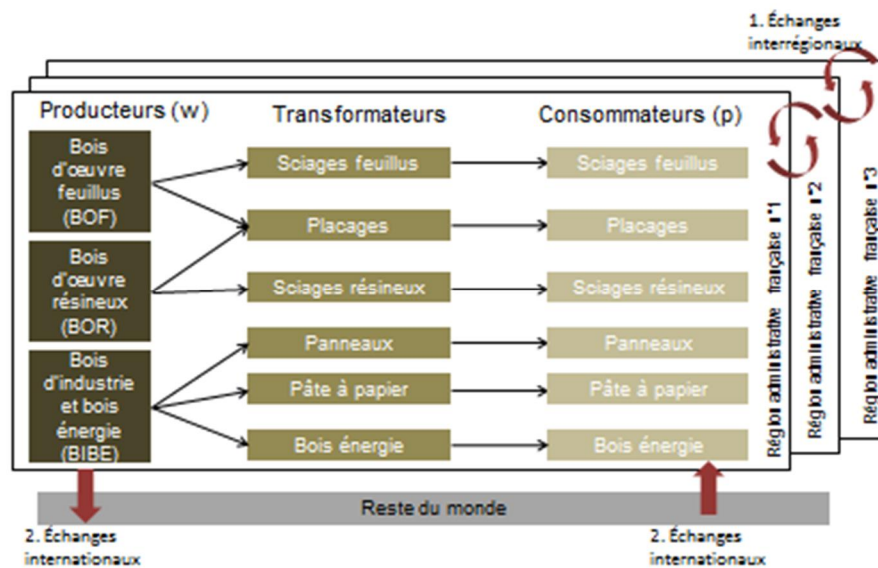


Figure 2.3 : Quelques détails du module de marché de FFSM

Le résultat du calcul de l'équilibre économique est un prix, une quantité offerte et une quantité consommée pour chaque produit et dans chaque région. Le modèle calcule également une quantité optimale de produits bois échangés entre régions (relation notée 1 sur Figure 2.3) en fonction d'un gradient de coûts de transports. Le modèle représente également l'échange de produits entre chaque région française et le reste du monde (relation 2 sur Figure 2.3) à travers une approche de la substituabilité imparfaite au sens de Armington (1969) qui stipule qu'un produit français (domestique) est imparfaitement substituable à un produit étranger (pour des raisons aussi diverses que les différences physiques, des habitudes culturelles, historiques, etc.). Dans le modèle, cette substituabilité imparfaite est captée par des élasticités de substitution, en partie calibrées par Sauquet *et al.* (2011).

Dans le cadre conceptuel d'Armington (1969), l'offre et la demande de produits domestiques dépend des prix des produits étrangers et des élasticités de substitution. Plus ces élasticités sont proches de 0 en valeur absolue, plus les biens sont hétérogènes et moins les prix internationaux vont gouverner l'offre et la demande de produits domestiques.³

Le module de marché transmet deux informations au module « ressource » et au module « gestion des surfaces forestières ». D'une part, il traduit l'offre, calculée en niveau de récolte afin d'intégrer la récolte anthropique dans la dynamique forestière au niveau du module de

³ On trouvera, dans l'Annexe 14 (Tableau 14.2, p. 6), tous les détails sur les valeurs retenues pour les paramètres d'entrée du modèle.

ressource. D'autre part, le prix calculé par le module marché est transmis au module de « gestion des surfaces forestières » qui représente les gestionnaires forestiers sous la forme d'un modèle multi-agents. Les gestionnaires y sont modélisés sous la forme d'agents économiques rationnels donc maximisateurs de leur profit et hétérogènes pour (a) le niveau de gestion « active » de leur ressource ; (b) leur degré d'aversion au risque et (c) la forme de leurs anticipations du changement climatique et des prix futurs. Le degré 0 d'anticipation est la myopie, c'est-à-dire que le gestionnaire ne considère que les informations qu'il peut observer à l'année t pour prendre une décision à l'année t , tandis qu'un degré maximal est l'anticipation parfaite où le gestionnaire a connaissance de tous les éléments futurs sur le changement climatique et/ou les prix. Ce module fonctionne à l'échelle du pixel soit 8x8 km dans le modèle : à chaque pixel correspond un agent représentatif.

Chacun de ces agents représentatifs utilise l'information à sa disposition (prix des produits, informations climatiques) pour attribuer les surfaces forestières libérées dans le module de ressources à des « structures » forestières (combinaison d'une essence et d'un type de gestion) qui maximisent le revenu anticipé par hectare. Une fois que la surface est régénérée, elle intègre à nouveau le module ressource qui modélisera sa dynamique.

La force du modèle réside dans l'interconnexion entre ces différents modules. Par exemple, Lobianco *et al.* (2015a) ont montré que, lorsque le changement climatique augmente les taux de mortalité des conifères dans le futur (comparativement aux taux de mortalité des feuillus), les gestionnaires forestiers préfèrent malgré tout régénérer les surfaces en conifères. Cela s'explique par deux leviers : d'une part, les produits bois issus des conifères sont économiquement plus rentables que leurs équivalents feuillus et, d'autre part, leur rareté augmente du fait de la surmortalité dû au changement climatique, ce qui augmente encore leur prix et donc leur rentabilité relative. Il s'agit d'un résultat qui pourrait apparaître comme contre-intuitif compte tenu des projections climatiques et qu'il n'est pas possible d'obtenir sans modèle intégré bio-économique.

IV. Le modèle GO+ pour intégrer les effets climatiques sur les facteurs de production forestière

Le modèle GO+ est un modèle de croissance, de production et de gestion forestière représentant les principaux processus biophysiques et biogéochimiques d'un écosystème forestier géré. Il est développé par les chercheurs de l'INRA ISPA depuis 1999 (cf. [Annexe 7, pp. 3-6](#)).

GO+ est principalement utilisé pour simuler les effets des scénarios climatiques et de la gestion forestière à l'échelle infra-régionale, régionale et nationale pour trois principales espèces forestières de production : Pinus, Fagus, Douglas. Il simule typiquement le fonctionnement d'une parcelle forestière comprenant un peuplement d'arbres, le sous-bois et le sol, depuis la régénération à la coupe finale. Le modèle considère une unité spatiale correspondant à un patch homogène de végétation forestière, typiquement un hectare. Il fonctionne à un pas de temps horaire mais les variables principales d'intérêt sont intégrées sur les échelles journalières, mensuelles voire annuelles.

GO+ décrit les principaux échanges dans le système sol-végétation-atmosphère, soit le bilan d'énergie, les cycles du carbone et de l'eau ainsi que les processus impliqués (transferts turbulents, flux de chaleur, évapotranspiration, diffusion entre l'air et le feuillage, photosynthèse, respiration, répartition du carbone, la croissance, la phénologie, l'immobilisation et les exportations minérales, mortalité, retours au sol et minéralisation du

carbone dans le sol). Il modélise la végétation selon une approche en deux couches, la canopée des arbres et la végétation du sous-étage.

La végétation est dynamique avec une description de la phénologie, de la sénescence, et de la mortalité des deux couches de végétation. Les effets des opérations de gestion forestières sur le sol et la végétation sont pris en compte : préparation du sol, fertilisation, drainage, élimination du sous-bois, éclaircies, élagage, recépage, coupe définitive, coupe à blanc et récoltes (tronc, branche feuillage, racines).

* *

*

Ce sont donc ces trois modèles qui ont été utilisés pour établir, selon les différents scénarios élaborés à l'horizon 2050, les différents éléments nécessaires au calcul des bilans carbone annuels de la filière forêt-bois française (stocks sur pied, mortalités, disponibilités, répartition des usages, etc., cf. Figure 2.4). Les scénarios de gestion, dont le narratif et les hypothèses ont été soumis et discutés par plusieurs professionnels de la filière, agissent directement sur certaines variables d'entrée du modèle MARGOT, notamment les niveaux de prélèvement qui ont été (sauf dans un cas) déterminés indépendamment des conditions de marché.

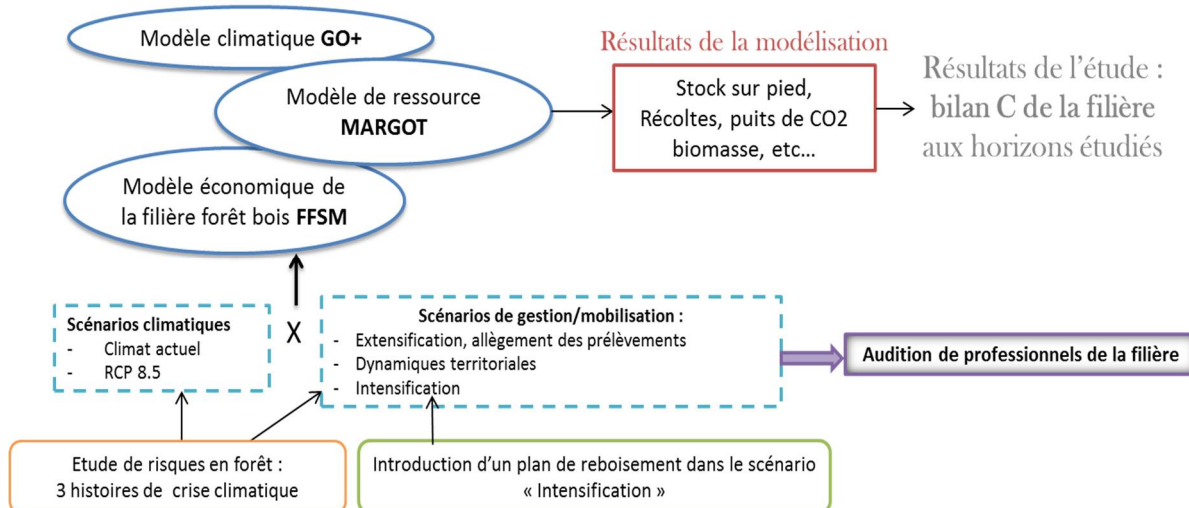


Figure 2.4 : Démarche générale de l'étude pour la simulation du potentiel d'atténuation du changement climatique par la filière forêt-bois française à l'horizon 2050

Les paramètres dynamiques de MARGOT ont été modifiés, à partir de résultats issus du modèle GO+, pour simuler la dynamique sous scénario RCP 8.5.

De son côté, le modèle FFSM a de fait été principalement mobilisé pour examiner les conditions dans lesquelles peuvent se mettre en place les options de gestion envisagées et notamment les efforts collectifs que nécessiterait l'accroissement des prélèvements en vue d'activer au mieux le stockage en produits bois et les effets de substitution. Il permet par ailleurs une analyse économique des résultats à attendre de deux des scénarios simulés.

CHAPITRE III. Incidence de trois scénarios de gestion et de deux scénarios climatiques sur le bilan carbone et le bilan économique de la filière forêt-bois française à l'horizon 2050.

La démarche d'évaluation du bilan carbone de la filière forêt-bois française mise en œuvre au chapitre I sur les données 2013, a été appliquée à des projections jusqu'en 2050, pour trois scénarios de gestion forestière élaborés de façon à être fortement contrastés et à jouer de façon différenciée sur les leviers relatifs au puits forestier, au stockage de carbone dans les produits bois ou aux effets de substitution induits par l'usage de ces mêmes produits bois. Aucun de ces scénarios de gestion n'a vocation à représenter explicitement des choix de politiques publiques ou de stratégie de filière (de type PNFB) même s'ils peuvent y faire penser. Il s'agit, comme dans toute démarche prospective, de se donner les moyens d'explorer un champ des possibles le plus vaste possible, sans présupposé sur un ou des scénarios souhaités ou souhaitables pour telle ou telle partie prenante.

Implémentés dans un premier temps en maintenant les conditions climatiques des dernières années sur toute la période 2016-2030, ces trois scénarios de gestion ont, par la suite, été simulés en y introduisant l'hypothèse d'une aggravation du changement climatique. Après avoir présenté la logique générale de ces trois scénarios et détaillé les éléments relatifs au plan de reboisement imaginé dans l'un d'entre eux, on restituera la vision que peuvent en avoir certains des acteurs de la filière à qui ils ont été soumis pour en examiner la crédibilité et en faire ressortir les freins et leviers. L'analyse et la discussion des résultats obtenus, après simulation par MARGOT et calcul des composantes du bilan carbone, pour chacun de ces trois scénarios dans les conditions climatiques actuelles ou dégradées seront complétées par une analyse des défis économiques à relever pour les mettre en œuvre.

I. Trois scénarios de gestion contrastés pour la filière forêt-bois française à l'horizon 2050

Dans le but d'examiner les variations possibles des termes du bilan carbone de la filière jusqu'à des horizons assez lointains comme 2050, il est nécessaire de fixer les trajectoires de gestion et de mobilisation de la ressource. Les éléments pris en compte dans les réflexions préalables à l'élaboration de ces scénarios de gestion sont multiples. Ils portent sur la discordance offre/demande en matière de ratio feuillus/résineux, les niveaux de prélèvement et la production de sciages, l'hétérogénéité géographique des taux de récolte, les modes de commercialisation (sur pied *versus* par contrats d'approvisionnement bord de route ou rendus usine), le degré de mécanisation des coupes, l'impact des procédés de sciage sur la formation de la valeur, la progression des stocks de gros bois-très gros bois, la consommation de plants forestiers (et l'évolution du ratio pin maritime/autres espèces), la densité des populations de grands ongulés, etc.

Nous nous sommes en outre inspirés d'une étude réalisée en France pour dégager des perspectives de valorisation de la ressource feuillue (FCBA, 2011) et de la prospective européenne SCAR-4 sur le développement de la bioéconomie (Mathijs *et al.*, 2015). Nos trois scénarios de gestion s'inscrivent dans le contexte général pris en compte par le rapport FCBA (2011) : modération de la croissance économique, changement démographique structurel (vieillesse), essor des objectifs environnementaux (dont les priorités peuvent varier entre recherche de naturalité, énergies renouvelables, prévention des dégâts), mondialisation des

échanges, progrès de la valorisation énergétique, abondance de la ressource feuillue. Toutefois, alors que l'étude FCBA n'avait retenu que deux scénarios (marginalisation de la forêt feuillue et filière feuillue dynamique et compétitive), nous avons fait ici un choix analogue à la partition en trois scénarios de la prospective SCAR (A-modération, B-abondance, C-rareté)⁴.

Les *drivers* qui différencient nos 3 scénarios de gestion imaginés sont, d'une part, la disposition des différents acteurs à investir en forêt et, d'autre part, le devenir industriel de la ressource feuillue française (cf. [Tableau 3.1](#) pour une présentation synthétique des scénarios). La disposition à investir, elle-même, dépend des conditions économiques (prix/coûts en valeurs apparentes, y compris fiscalité, subventions, coût du travail), mais sans doute aussi de valeurs subjectives liées aux modes de représentation de la durabilité et de la multifonctionnalité. La valorisation de la ressource feuillue revêt de nombreux aspects technologiques, réglementaires, économiques, sociaux et sylvicoles ; elle aura un effet critique sur l'ensemble de la filière forêt-bois, compte-tenu de l'affaiblissement actuel très prononcé des capacités de transformation nationales et de l'effet d'entraînement et de rupture qui pourrait un renversement de la tendance régressive des 30 dernières années.

I.1. Scénario « Extensification et allègement des prélèvements »

La pression sociale pour une plus forte naturalité couplée à un contexte de signaux prix et politique peu incitatifs, aussi bien pour les industriels que pour les forestiers, encourage la poursuite d'une extensification, voire d'un abandon de la gestion pour une partie des peuplements. Ces processus, déjà bien engagés en haute montagne, peuvent s'étendre peu à peu à de grandes zones de plaine et de moyenne montagne où les propriétés forestières de petite taille, privées ou communales, ont peu de capacités pour faire face aux risques climatiques. Les fragilités industrielles locales, renforcées par la préférence pour la vente de grumes haut-de-gamme sur les marchés internationaux, contribuent directement à la vulnérabilité socio-économique et organisationnelle de la filière tant localement que nationalement.

Les attributs de naturalité des forêts se renforcent très significativement, avec de vastes surfaces forestières en libre évolution. Ces espaces, mal ou pas du tout équipés pour la sylviculture, font l'objet de quelques coupes de cueillette sporadiques. La fréquence croissante de dégâts non récoltés (arbres secs, chablis, arbres attaqués par des insectes) induit une accumulation de bois-mort. L'expansion de la surface forestière se fait sur un rythme modéré (40 000 ha/an), uniquement sous forme de peuplements spontanés. Les forêts en haute montagne et en région méditerranéenne font l'objet d'une gestion minimale (débroussaillage réglementaire dans les zones à risque d'incendie), tandis que certaines forêts du Massif Central restent sous-exploitées.

Parallèlement, une minorité de forêts (30 à 40 % en surface) restent gérées avec un objectif de production-bois : forêts domaniales, forêts communales des régions où la tradition de sylviculture productive perdure (notamment le nord-est), forêts privées de grande taille, massif

⁴ « Scenario A assumes that the growth in demand for biomass for materials and energy is relatively low, for instance because solar, wind and other clean energy technologies take off more quickly than expected, making bio-based solutions less competitive. In this scenario, it does not matter so much whether the supply growth is low or high, so here we only assume a medium level of supply growth. We call this scenario BIO-MODESTY. Scenario B assumes that growth in demand for biomass for materials and energy is relatively high, while supply growth is also high. We therefore call this the BIO-BOOM scenario—a scenario in which a high demand for biomass coming from the non-food bio-based economy is met by supply. Scenario C assumes that the same driving forces leading to high demand for biomass to be used by non-food applications apply. Low supply growth is assumed, for instance because of societal resistance towards new technologies. As a result, the amount of biomass available for bio-based materials & chemicals and bio-energy is lower than it is now (and even 0 for biofuels). However, when the food-first rule cannot be enforced, high demand will increase prices for biomass considerably, as biomass is a scarce commodity. We thus call this scenario BIO-SCARCITY » (Mathijs et al., 2015).

landais qui s'adapte aux dégâts climatiques et entretient sa singularité de étroite intégration forêt-industries. Sauf dans les Landes, la pratique dominante est basée sur la régénération naturelle et la recherche de marchés de niche à l'export sur la base de cueillette de produit bois.

**Tableau 3.1 : Synthèse de la description
des scénarios de gestion et de mobilisation de la ressource ⁵**

<u>Éléments de scénario</u>	<u>Extensification et allègement des prélèvements</u>	<u>Dynamiques territoriales</u>	<u>Intensification et augmentation des prélèvements</u>
Mise en œuvre de la gestion forestière durable	Vastes espaces en libre évolution + sylviculture-proche de la nature	Prépondérance de la régénération naturelle, transformations après grandes crises, gibier très contraignant	Maîtrise du gibier, âges d'exploitabilité raccourcis, transformation des essences, plantations, amendements
Modes d'adaptation au changement climatique	Passif : on fait confiance aux capacités d'adaptation spontanée et au pilotage de la dynamique naturelle	Réactif/passif : décisions d'adaptation programmée après crises, ou bien on laisse faire (selon intensité de gestion régionale)	Proactif: programmation et gestion adaptative (diversification, transformations visibles et intentionnelles, recherche de résilience via systèmes de production)
Régulation de l'usage des terres	Légère extension des aires protégées	Contrats d'approvisionnement en forêts communales de l'Est et propriétaires forestiers du Massif Central, adaptation de Natura 2000 au CC	Gestion groupée, contractualisation, partenariats public-privé, adaptation de Natura 2000 au CC
Variations entre régions	Sous-gestion Massif Central, gestion minimale en haute montagne et régions méditerranéennes	Fortes divergences dans les options et l'investissement ; la haute montagne et les régions méditerranéennes restent extensives	Remise en gestion partielle de tous les massifs montagneux, récoltes de bois-énergie et bois d'industrie en secteur méditerranéen
Expansion de la surface forestière	Rythme modéré (400 km ² /an), uniquement sous forme d'accrus spontanés	Rythme modéré (400 km ² /an), quelques plantations localisées	Rythme modéré (400 km ² /an), en plus d'une part de nouvelles plantations : + 50.000 ha/an pendant 10 ans (cf. plan de reboisement)
Niveau de récolte national	Maintien au niveau 2015 en valeur absolue (volume récolté, cumul national tous usages), soit ≈50 Mm³ VAT/an	Maintien des taux de coupes, ≈50 % de l'accroissement net (allant vers 70 Mm³ VAT/an en 2050)	Allant vers un accroissement des taux de coupes allant de 70 à 75 % de l'accroissement net, soit 90 Mm³ VAT/an en 2050
Allocation de la récolte entre usages	Déplacements d'usages : poursuite de la tendance au « grignotage » des gros diamètres par des débouchés bois-énergie	Hétérogène selon les options prises régionalement, allocation commandée par l'aval (bois d'industrie pénalisé/BE)	Nouveaux procédés pour valoriser les feuillus, extension des forêts spécialisées, contrats d'approvisionnement équilibrant l'offre entre BO, BI et BE

⁵ Certains éléments d'évolution décrits dans ce tableau conditionnent les variables d'entrée des modèles, notamment MARGOT et FFSM. Au-delà du plan de reboisement du scénario « Intensification », il s'agit principalement des variables relatives au niveau de récolte national, celles relatives à la répartition de la récolte entre usages ayant été, à ce stade, peu prises en compte lors de la mise en œuvre des modèles.

Bois-énergie	Augmentation modérée via les importations (offre locale limitée)	Augmentation forte (réseaux de chaleur)	Augmentation très forte (chaleur + cogénération + biocarburants 2G)
Tissu industriel national	Poursuite de l'affaiblissement du sciage feuillu, transformation nationale concentrée dans quelques sites industriels à longs rayons d'approvisionnement	Entreprises de tailles moyenne à grande, légère progression de la collecte des coopératives forestières mais de manière inégale entre les territoires, alimentation progressive en bois énergie et bois d'industrie avec les surplus de récolte	Transition vers de nouvelles industries du feuillu ; Développement de 2-3 sous-filières nouvelles pour valoriser les ressources, transformation structurée autour de grands industriels et PME, forte progression collecte des coopératives forestières
Commerce international	Exportation de grumes feuillues haut de gamme, importations (plaquettes, sciages, pâte, panneaux, meubles), déficit commercial très fort	Moins de grumes feuillues à l'export, fort déficit en sciages résineux, déficit commercial fort	Déficit commercial modéré, pour compenser l'inadéquation offre/demande (feuillus/résineux) + meubles
Investissements forestiers	Renouvellement des dessertes existantes, travaux sylvicoles minimaux dans les zones productives ou à forts risques d'incendies	Dans certaines régions, extension de desserte, travaux sylvicoles, cloisonnement, protection contre le gibier	Développement des outils numériques, doublement de la desserte en montagne, mécanisation (feuillus + montagne), travaux sylvicoles, plantation, recyclage des cendres de chaufferie
Investissements de formation	Maintien du dispositif actuel de formation	Priorité plus forte à la commercialisation, aux travaux forestiers, à la mécanisation	Évolution approfondie : numérique, planification, logistique, travaux, commercialisation, mécanisation, intégration de l'amont-aval, optimisation de la chaîne de valeur
Puits de C - évolution attendue	Capitalisation rapide, approfondissement du stockage de C forestier (dans une première phase) puis évolution liée aux dégâts	Capitalisation modérée	Freinage du stockage de C forestier : celui-ci est inférieur à sa valeur 2015
Impact des plantations forestières	Quasiment imperceptible (sauf Aquitaine)	Modéré : Aquitaine, transformation des forêts publiques de plaine, quelques introductions à but expérimental dans la recherche de solutions pour l'adaptation au CC	Fort : transformations proactives, diffusion des plantations à forte productivité (résineux, peuplier, eucalyptus), remise en production de forêts feuillues et résineuses en montagne
Impact attendu des dégâts forestiers	Mortalité de fond évoluant au gré du vieillissement des peuplements + bois-mort & combustible + dépérissements dus à la mauvaise adaptation + accidents sanitaires (ex. chalarose/frêne)	Mortalité de fond en hausse + dépérissements dus à la mauvaise adaptation + accidents sanitaires (ex. chalarose/frêne)	Reconversion des peuplements dépérissants + accidents sanitaires lié à l'artificialisation des peuplements (ex. maladie des bandes rouges / pin laricio) Atténuation des risques incendie & tempête

L'attitude vis-à-vis de l'adaptation au changement climatique privilégie la protection des aires protégées existantes, avec une extension modérée de leur réseau. Au-delà, elle est principalement passive : les sylviculteurs n'engagent pas de travaux de transformation car ils ont confiance dans les capacités d'adaptation des écosystèmes forestiers et les processus de dynamique naturelle. L'absence de machines adaptées ainsi que la faible propension à ouvrir des cloisonnements d'exploitation contraignent la mécanisation des récoltes feuillues. L'argument, selon lequel la transformation des forêts par des méthodes « agronomiques » pendant la période d'après-guerre a été responsable de la vulnérabilité actuelle des forêts rationalise souvent le choix (en partie contraint) d'éviter les travaux et investissements forestiers.

Le niveau de récolte national⁶ reste, sur la période, proche du niveau actuel (2016) en valeur absolue, soit environ 50 Mm³ VAT/an (volume récolté, cumul national tous usages). Les usages des bois feuillus continuent à se déplacer vers le débouché bois-énergie, complétant un petit marché de grumes haut de gamme pour l'export.

Avec la poursuite de l'affaiblissement du sciage feuillu, la transformation nationale est concentrée sur la ressource résineuse et réalisée par quelques sites industriels à longs rayons d'approvisionnement. Les progrès de la bioéconomie sont alimentés par des importations de plaquettes, sciages, pâte, panneaux, meubles, creusant le déficit commercial de la filière forêt-bois. Les investissements se concentrent sur le renouvellement des dessertes existantes et des travaux sylvicoles minimaux dans les zones productives ou à fort risque d'incendie.

Compte tenu de l'absence de gestion active qui caractérise une majorité de forêts dans ce scénario, on attend, dans un premier temps, la poursuite ou l'accélération de la capitalisation rapide observée depuis 30 ans, dont le corollaire est un approfondissement du puits de carbone déclaré en application de la CCNUCC par notre pays. À l'échéance de quelques décennies, le ralentissement de la croissance forestière lié au vieillissement des peuplements en place, la recrudescence d'accidents sanitaires liés au CC et les faibles capacités de la filière à y faire face (faible récolte et stockage, renouvellement par régénération naturelle) pourraient induire une évolution moins favorable des ressources en bois mobilisables.

I.2. Scénario « Dynamiques territoriales »

Nous sommes ici dans une trajectoire d'évolution réactive par paliers, où acteurs de la filière et politiques forestières s'appuient sur les crises pour induire des changements porteurs de divergence de trajectoires entre territoires, avec un fort rôle d'orientation pris par les nouvelles grandes régions qui se substituent à l'État en tant que cadre de l'action collective.

Dans un contexte de fortes transformations sociales et économiques (recherche d'autonomie énergétique locale, essor de l'agroécologie, réinsertion des aires urbaines dans les circuits de production - notamment agricoles), les professionnels forestiers sont « aspirés » vers d'autres domaines d'activité qui sollicitent et valorisent leurs compétences davantage que le secteur forestier lui-même (agroforesterie, écotourisme, écologie urbaine, économie circulaire...). Du fait de cette concurrence extérieure, le moteur de ce scénario est la force de la demande en biomasse (les évolutions sont tirées par des filières extérieures au secteur forestier), surtout pour l'énergie et associée à des prix peu rémunérateurs, ce qui induit une simplification des pratiques de gestion et une spécialisation des objectifs.

Les forêts s'étendent à un rythme modéré (40 000 ha/an), principalement sous forme d'accrus spontanés avec quelques grandes zones de plantation. La gestion des forêts reste extensive

⁶ Récolte = prélèvements – pertes d'exploitations

dans les régions de haute montagne et les régions méditerranéennes, certaines zones (de montagne) restent confrontées à la problématique de la desserte forestière, tandis que les propriétaires privés du Massif Central et les régions de forêts communales de l'est font des efforts de regroupement et de contractualisation. Les régions prennent le relais de l'État pour la élaboration de politiques forestières, en prenant des options variées selon les configurations locales (à la fois en termes d'usages encouragés et de financements). L'offre de bois augmente en provenance de l'agroforesterie et de plantations dédiées périurbaines.

Forestiers et industriels sont conscients des risques climatiques, mais le jeu des contraintes socio-économiques, sylvicoles et environnementales laisse peu d'opportunités pour transformer les pratiques comme ils le souhaiteraient (par exemple, dégâts de gibier très contraignants pour le renouvellement). Combinés à la forte demande en biomasse, à la simplification des pratiques et à la régionalisation partielle des politiques, ces changements accentuent progressivement l'hétérogénéité des paysages forestiers, ce qui se révèle plutôt favorable à la biodiversité.

Le prélèvement augmente par à-coups, essentiellement orienté par les récoltes de sauvegarde après incendies, chablis ou épisodes de pullulation de ravageurs. Pris globalement, cette trajectoire pourrait se traduire par un maintien du taux de prélèvement actuel sur la période (soit 50 % de l'accroissement biologique net), le volume récolté évoluant vers les 70 Mm³ VAT/an en 2050. De nouveaux procédés sont développés pour valoriser les feuillus, principalement par des groupes industriels étrangers qui s'installent là où les approvisionnements sont sécurisés par contrats (cette réindustrialisation des feuillus est donc, elle aussi, hétérogène entre régions). La répartition du bois entre les différents usages est pilotée exclusivement par les marchés. Notamment, le bois d'industrie est pénalisé par la forte demande en bois-énergie pour alimenter des réseaux de chaleur. La collecte des coopératives progresse de manière inégale entre territoires.

Le tissu industriel national est structuré par des entreprises de taille moyenne à grande. L'exportation des grumes feuillues se poursuit sur un rythme modéré, le déficit en sciages résineux et, plus généralement, celui de la balance commerciale de la filière forêt-bois restant forts. Le niveau des investissements est hétérogène, avec une légère extension des dessertes et des travaux sylvicoles concentrés dans les régions où la demande aval et l'action politique locale combinent leurs effets.

1.3. Scénario « Intensification et augmentation des prélèvements, stimulée par un plan de reboisement actif »

1.3.1. Le déroulement général du scénario

Ici, le contexte économique et politique est favorable à une transition approfondie pour les forêts de métropole : d'une part, la consommation des bois feuillus est facilitée par une combinaison d'innovations technologiques, de démarches de normalisation, d'investissements venant de multinationales étrangères et/ou de filières industrielles françaises en voie de reconversion, d'efforts de formation et de fortes incitations publiques au regroupement des propriétés, à la contractualisation et à la simplification des pratiques d'aménagement ; d'autre part, la conjoncture est plus propice à l'investissement forestier, du fait de marchés motivants et d'une fiscalité plus favorable aux secteurs vertueux du point de vue climatique et moins pénalisante pour les activités intensives en main-d'œuvre. Ce contexte favorise une gestion plus active des forêts, conçue dans un but combinant les différentes facettes du changement climatique : amplifier la contribution à l'atténuation ; permettre la mise en œuvre de diverses

stratégies d'adaptation, notamment pour sécuriser les services écosystémiques ; améliorer l'efficacité de la filière pour mieux absorber les chocs consécutifs aux événements extrêmes.

L'usage des sols forestiers évolue, sous l'effet de innovations d'organisation : gestion groupée par grands massifs (y compris massifs composites associant propriétés publiques et privées), forte extension de la contractualisation (chasse, commercialisation, bilan de gestion durable, mesures spécifiques de biodiversité), adaptation des objectifs de Natura 2000 au contexte du changement climatique. Les forêts de montagne sont en partie remises en gestion et, pour certaines, reconstituées (comme en haute montagne), tandis que les forêts méditerranéennes fournissent davantage de bois-énergie, de bois d'industrie et sciages résineux. L'expansion spontanée de la surface forestière se fait là aussi à un rythme modéré (+ 40 000 ha/an), à laquelle s'ajoute une part significative de plantations sur des surfaces déjà forestières mais peu productives, l'objectif visé étant un plan de reboisement de 500 000 ha étalés sur les 10 premières années de la période.

Les modes de gestion sylvicole sont marqués par des âges d'exploitabilité raccourcis (réduction des risques et adaptation aux procédés de transformation valorisant les petits diamètres), un usage accru de la plantation comme mode de renouvellement, la pratique régulière d'amendements et un équilibre forêt-gibier restauré. La maîtrise, la réorientation et le monitoring du matériel végétal deviennent des marqueurs importants de gestion durable : cela concerne bien sûr les variétés améliorées, mais aussi les pratiques de migration assistée, l'introduction de nouvelles essences et variétés offrant de bons compromis performance/résistance, la conservation des ressources génétiques coordonnée à l'échelle européenne. L'application des guides de sylviculture est facilitée par les procédures de gestion groupée. Les plantations forestières auront, à terme (c'est-à-dire au-delà de 2050), un fort impact sur la production totale tant en quantité qu'en qualité, grâce à la diffusion de variétés très productives (résineux, peuplier, eucalyptus), issues de programmes de sélection redéfinis dans un contexte d'interactions entre impacts du changement climatique et bioéconomie.

L'attitude vis-à-vis du changement climatique est principalement proactive : diversification des options, transformations, recherche de résilience organisationnelle à travers les systèmes de production, renouveau de la planification et du monitoring. Pour stimuler la contribution forestière à l'atténuation, un programme de plantations à forte productivité, détaillé plus loin, est mis en œuvre, et on observe un développement soutenu de forêts à cycle court, tournées vers l'industrie, à la fois dans le massif landais et dans d'autres régions où ces itinéraires viennent contribuer à la diversification des massifs en espèces forestières et en classe d'âge.

Le niveau de récolte nationale augmente progressivement et vise les 90 Mm³ VAT/an à partir de 2050, ce qui pourrait correspondre à 70-75 % de l'accroissement biologique net à cette date. La valorisation des bois feuillus se développe autour de 2-3 sous-filières nouvelles, stimulées par le cadre politique plus incitatif ; la transformation est structurée autour de grands groupes industriels et d'un réseau de PME émergeant pour tester de nouveaux procédés financés par de nouveaux canaux financiers (mécénat, *crowdfunding*) ; de nouveaux produits et solutions constructives mixant feuillus et résineux voient le jour. Les Coopératives et les experts forestiers voient leur activité stimulée en forêt privée, avec une forte augmentation de la collecte et la prise en charge de la gestion complète des nouvelles entités de gestion groupée. La filière reste déficitaire, mais plus modérément.

Le niveau des investissements est élevé : numérisation des procédés, doublement de la desserte en montagne, efforts de mécanisation et *process* pour les feuillus et résineux de gros diamètre, plantations, travaux sylvicoles, recyclage des cendres de chaufferies et utilisation

en amendements. Les investissements en formation sont également significatifs, avec un effort pour attirer les jeunes sur les technologies adaptées à une gestion active (planification, logistique, commercialisation, travaux, intégration amont-aval, optimisation de la chaîne de valeur).

La mortalité est atténuée par la reconversion des peuplements vieillissants ou déperissants, de même que les dégâts induits par les incendies et tempêtes. Les accidents sanitaires d'origine biotique sont prépondérants (par exemple, chararose sur frêne, maladie des bandes rouges sur Pin laricio).

Ce scénario « Intensification », qui prévoit une augmentation progressive des prélèvements jusqu'en 2050, a pour avantage, d'une part, de permettre aux industries (pépiniéristes, première transformation française) d'adapter progressivement leurs capacités de production et, d'autre part, de ne pas être la cause de brutales pertes de production ou de chutes d'aménités sociales ou environnementales.

1.3.2. Mise en place d'un plan de reboisement, composante-clé du scénario « Intensification » aux effets attendus au-delà de 2050

Dans un tel contexte d'intensification et d'augmentation des prélèvements, la faisabilité d'un plan de reboisement s'appuyant sur les propositions formulées dans Madignier *et al.* (2014) a été examinée. Cette réflexion a permis, notamment, de définir les moyens à mettre en œuvre pour réaliser un plan de reboisement progressif de 500 000 ha étalé sur les 10 prochaines années et procurant un différentiel de productivité de + 10 m³ par hectare et par an en moyenne par rapport à la situation actuelle. L'objectif visé est une production supplémentaire de 3 à 5 Mm³ de bois.

En termes de faisabilité et de moyens, la réflexion s'est articulée autour de trois points clés du reboisement : choix d'espèces, choix de sylviculture, choix de régions d'implantation. La démarche suivie, dont on trouvera tous les détails et les résultats précis en [Annexe 6](#) du présent rapport, s'appuie sur un panel de dix espèces. La plupart dépassent les 15 m³/ha/an en productivité, certaines autres atteignent plus difficilement ce seuil mais permettent d'exploiter des conditions stationnelles plus contraignantes, par exemple, dans le massif landais ou en région méditerranéenne (cf. [Annexe 6](#), pp. 3-4).

Un plan de reboisement de cette envergure, même progressif (cf. [Figure 3.1](#)), induit des besoins supplémentaires en plants qui, compte-tenu des objectifs visés, s'élèvent à environ 60 millions de plants par an, toutes essences confondues. On est donc assuré que la plupart des essences proposées seront garanties d'un approvisionnement suffisant et régulier à partir d'une ou plusieurs des sources actuelles (vergers à graines, peuplements sélectionnés, boutures, etc.) moyennant une montée en puissance des récoltes de matériels forestiers de reproduction et, pour quelques espèces, le recours à des importations de graines. Par ailleurs, un entretien réalisé avec un des principaux pépiniéristes forestiers nous permet de penser que le réseau des pépinières forestières françaises, qui a considérablement réduit sa production depuis 20 ans, serait en mesure de se réadapter très rapidement à la production des 60 millions de plants nécessaires (cf. [Annexe 6](#), pp. 4-6).

Pour assurer une productivité accrue de 10 m³/ha/an, des sylvicultures dynamiques devront être mises en place. Elles viseront des révolutions souvent bien en-deçà de 50 ans. Selon les caractéristiques de chaque espèce, un ou plusieurs des trois itinéraires sylvicoles suivants ont été proposés : 1) sylviculture classique à vocation bois d'œuvre, 2) sylviculture semi-dédiée à

vocation bois énergie dans le jeune âge, puis bois d'œuvre et 3) sylviculture à courte révolution à vocation exclusivement biomasse pour les essences qui s'y prêtent (cf. Annexe 6, pp. 6-8).

En s'appuyant sur la base de données de l'IGN, le choix des zones à reboiser (500 000 ha) a privilégié par priorité décroissante : (i) des stations dans le grand Ouest de la France aptes à porter des reboisements très productifs, (ii) des stations du grand Est semi continental avec un faible taux actuel de prélèvement, (iii) certaines stations en impasse sylvicole liée à la présence de pathogènes (frêne, châtaignier, pin laricio, ...), (iv) des stations en région méditerranéenne aptes à être valorisées et (v) les peupleraies non entretenues (cf. Annexe 6, pp. 8-14).

Complémentaire à une répartition des espèces dans ces zones sur la base de leur adaptation pédoclimatique, un ou plusieurs itinéraires sylvicoles ont été définis pour chaque espèce et une ventilation de ces itinéraires a été appliquée. Enfin, la dynamique du reboisement n'a pas été considérée comme linéaire ; elle prend en compte la nécessaire « montée en puissance » de l'effort de reboisement au cours des 10 années prévues pour réaliser le plan de reboisement (cf. Figure 3.1).

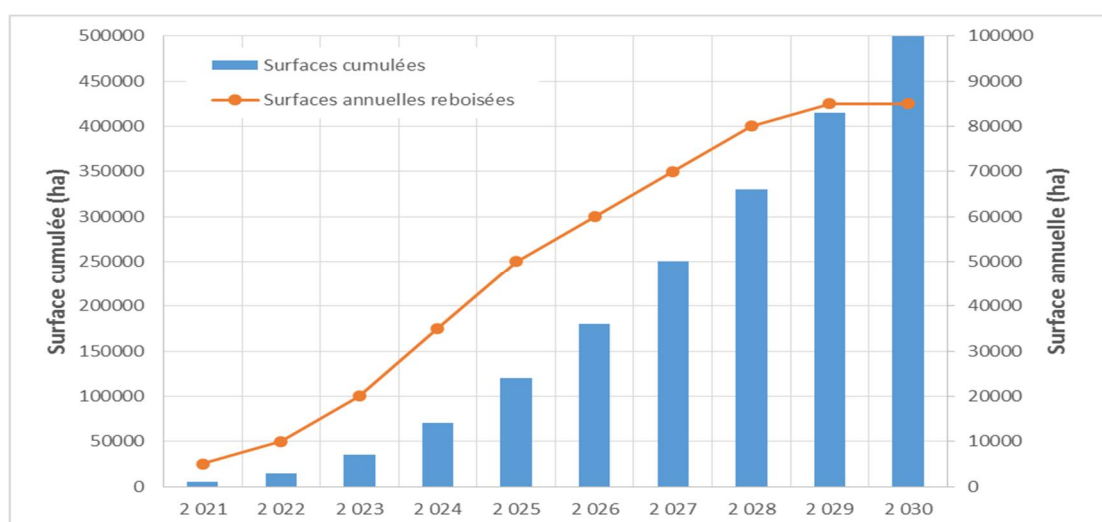


Figure 3.1 : Surfaces reboisées annuellement et cumulées de 2020 à 2030

Au final, le Douglas et le Pin maritime constituent, en termes de surfaces reboisées, les deux principales essences envisagées, suivies de deux espèces d'importance moyenne (Mélèze hybride et Peuplier) (cf. Figure 3.2)⁷. L'effort principal concerne les peuplements essentiellement feuillus dans les grandes régions écologiques (GRECO) prioritaires (grande moitié Ouest de la France) et les peuplements en impasse sylvicole (84 %). Un complément non négligeable est néanmoins fourni dans les GRECO de l'Est (11 %), tandis que la région méditerranéenne et la strate « peupleraies non entretenues » complètent le projet (5 %).

⁷ Les diverses raisons qui aboutissent à ces choix d'essence sont détaillées dans l'Annexe 6 de ce rapport.

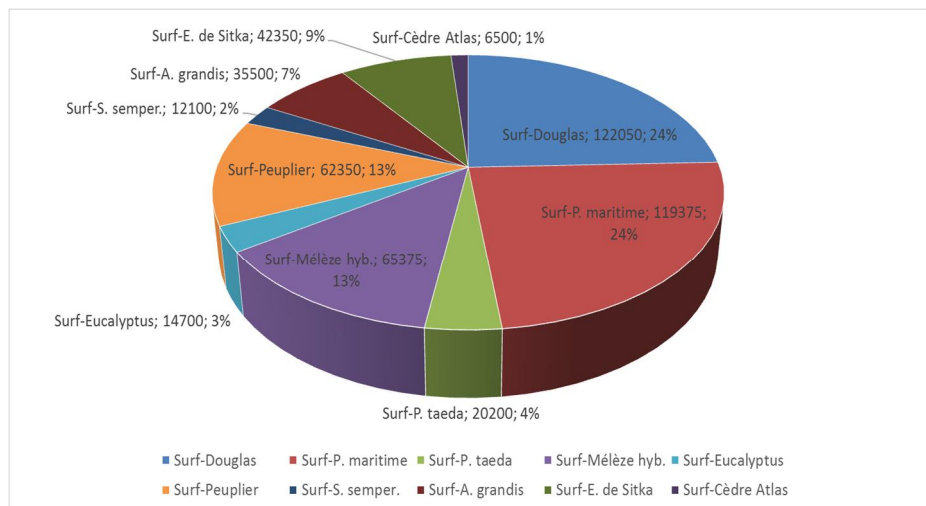


Figure 3.2 : Pourcentage d'utilisation de chaque espèce dans le plan de reboisement

Introduites dans le modèle MARGOT, toutes ces données permettent d'établir l'évolution dans le temps de la croissance de ces peuplements. La Figure 3.3 illustre l'effet de la mise en place du plan de reboisement sur la disponibilité en bois, à l'horizon 2100.

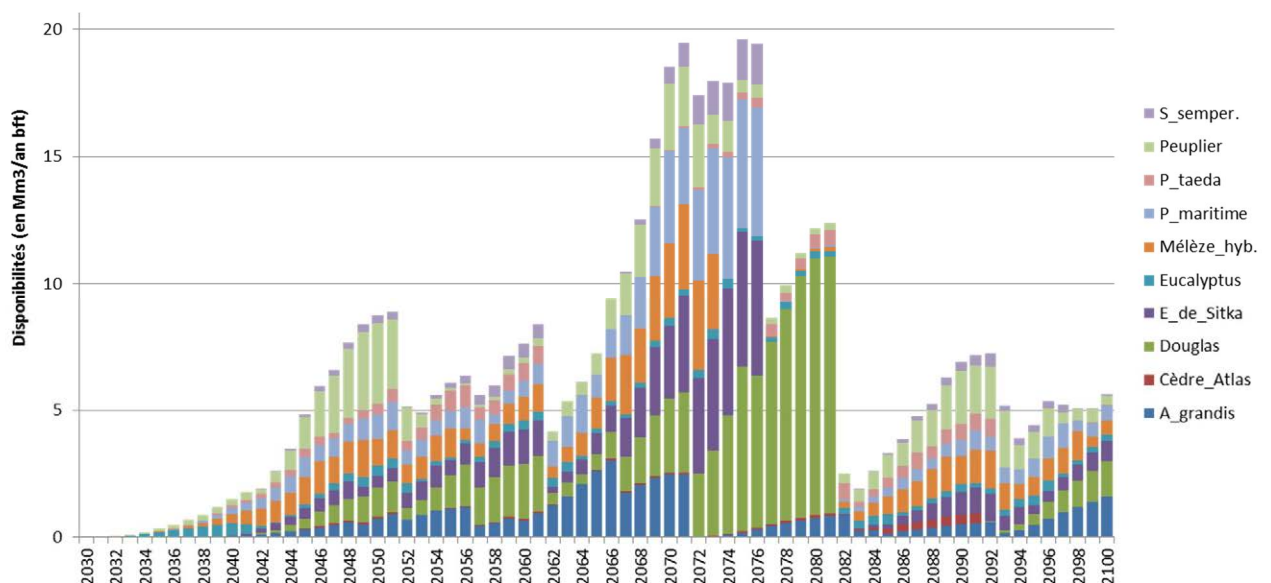


Figure 3.3 : Disponibilités supplémentaires issues de la mise en place du plan de reboisement, à l'horizon 2100.

Il en ressort clairement qu'un tel plan de reboisement ne peut avoir qu'un faible impact sur la disponibilité de la ressource à l'horizon 2050 visé par la présente étude. À cet horizon, trop rapproché au vu des processus forestiers, un léger pic de disponibilité apparaît, essentiellement lié à l'arrivée à maturité des nouvelles plantations de peupliers. Le vrai pic de disponibilités, qui avoisinerait les 20 Mm³ BFT/an, n'est attendu qu'aux horizons 2070, période de l'arrivée à maturité simultanée des pins maritimes et des mélèzes hybrides, ces derniers étant ensuite relayés par les épicéas de Sitka. Ce pic se prolongerait ensuite, mais avec une intensité moindre, grâce aux plantations de Douglas, avant un nouveau cycle de disponibilités quelque peu ralenties.

I.4. Des scénarios de gestion et un plan de reboisement mis en discussion

I.4.1. Leviers et blocages à la réalisation des scénarios dynamiques vus par les acteurs de la filière

Ces trois scénarios ont été mis en discussion auprès d'une douzaine d'acteurs de la filière forêt-bois française⁸ en leur demandant de préciser pour chacun des scénarios les blocages et les leviers qu'ils identifient à leur réalisation. Deux scénarios ont particulièrement retenu l'attention des acteurs auditionnés : le scénario « Dynamiques territoriales » que certains considèrent comme s'apparentant à la poursuite de la trajectoire actuelle et le scénario « Intensification avec plan de reboisement ».

Plusieurs blocages communs à ces deux scénarios ont été identifiés, parmi lesquels :

- Un prix des bois peu incitatif et des coûts de mobilisation importants,
- Une structure foncière et sociale de la forêt pénalisante,
- Une desserte des massifs insuffisante et une mécanisation de l'exploitation des feuillus encore balbutiante,
- Des verrous technologiques pour le développement de l'utilisation du bois dans la construction.

A l'inverse, des leviers communs à leur réalisation ont également été repérés :

- Des actions d'éducation et de communication visant à la fois les acteurs pour les inciter et motiver pour intervenir, et les usagers pour leur faire partager les enjeux concernés,
- Des moyens pour développer les innovations et les investissements visant des gains de productivité, la formation des opérateurs,
- Des nouveaux partenariats public-privé et des nouveaux financements qu'ils soient privés au travers des crédits carbone, du mécénat, ou publics, taxes carbone, ,
- Une meilleure organisation de la filière pour lui permettre de gagner en compétitivité, de développer les complémentarités, en particulier sur la ressource, d'améliorer les dessertes.

Les blocages spécifiques au scénario « Dynamiques territoriales » portent sur les tensions prévisibles entre les différents usages du bois et les risques de compétition entre les différents territoires. Il nécessitera la mise en place d'un dialogue interprofessionnel approfondi, visant à définir et préciser les politiques forestières régionales, s'appuyant sur la déclinaison du Programme National Forêt Bois, à apprendre aux territoires à s'organiser autour de la ressource forestière pour développer l'utilisation du bois, à préconiser les circuits courts, en particulier, en lien avec la transition énergétique.

L'absence de choix clair d'une politique forestière, les difficultés de reboiser, tant pour des questions d'acceptabilité, de conflits d'usage des sols avec l'agriculture, d'équilibre forêt/gibier, de disponibilité des entreprises, de coûts, les difficultés de valorisation des feuillus apparaissent pour l'ensemble des acteurs des blocages importants pour le développement d'un scénario de type « Intensification avec augmentation des prélèvements ».

Pour y remédier, il apparaît nécessaire de préciser les axes d'une politique forestière nationale, de développer le numérique et les nouvelles technologies, d'inventer les nouvelles industries pour les peuplements feuillus, de développer les partenariats avec les métropoles, etc.

⁸ Dont on trouvera la liste complète en [Annexe 5](#) du présent rapport.

1.4.2. Intérêt et limites du plan de reboisement

L'objectif ambitieux du plan de reboisement tant en termes de surfaces que de productivité a conduit à orienter les choix vers des essences à croissance rapide, des implantations dans des milieux présentant peu de contraintes (sol, pente, climat, etc.) et une priorité donnée au remplacement de peuplements où peu de bois est actuellement mobilisé. D'autres surfaces, sans doute importantes, pourraient être mises en valeur par des opérations de boisement, mais nous avons choisi délibérément de ne pas les considérer ici, compte-tenu des attentes décrites en préambule.

La répartition des surfaces entre les différentes essences choisies, au sein des différents territoires à reboiser, est évidemment un choix fort de l'étude. La stratification régionale nous a aidé à choisir en fonction des connaissances disponibles pour chacune des essences, mais il a fallu également faire des compromis entre l'ambition du plan de reboisement et un certain réalisme technico-économique. En effet, une essence très peu utilisée jusqu'à présent peut difficilement être mise en œuvre à grande échelle d'ici 10 ans, même si son potentiel est reconnu. C'est ce qui explique que l'essentiel des surfaces du plan de reboisement est constitué d'essences déjà largement connues.

Par rapport aux pratiques actuelles, les choix réalisés augmentent les densités de plantation et raccourcissent les durées de révolution. Le premier choix permet d'augmenter significativement la production totale des peuplements et, dans le même temps, d'améliorer certaines caractéristiques des produits (densité du bois, taille des nœuds). L'augmentation des densités de plantation permet également de réussir plus facilement les plantations (dilution des dégâts de gibier, fermeture du couvert plus rapide, stimulation de la croissance en hauteur dans le jeune âge). En revanche, ce phénomène amplifiera la demande en matériel forestier de reproduction (MFR). La réduction des durées de révolution permet, quant à elle, de diminuer l'exposition au risque de chablis et permet d'augmenter la substitution carbone (plus de bois mis en œuvre par unité de surface et de temps). De la même façon, le raccourcissement des cycles permet de produire des bois de diamètre moyen, faciles à récolter mécaniquement et fortement demandés par l'industrie. En revanche, la récolte de bois très jeunes nécessitera un suivi de la fertilité des sols et d'éventuelles compensations par amendement. La forte proportion de bois juvénile et la duraminisation pourraient justifier des efforts ciblés d'amélioration génétique.

Au-delà du plan de reboisement dimensionné ici sur une période de 10 ans, des besoins en R&D apparaissent naturellement pour soutenir, dans la durée, le renouvellement des plantations. En matière d'amélioration génétique et de création variétale, il convient d'anticiper les besoins en MFR et de préparer les futures générations de variétés améliorées, pour les essences majeures, bien sûr, mais aussi pour des espèces secondaires dont on connaît toutefois le potentiel. Il convient aussi d'optimiser la production dans les vergers à graines et d'améliorer le ratio plant sorti / graine produite. Une mise en réseau de tous les acteurs de la filière (recherche et développement, gestion, semenciers, pépinières) apparaît, à ce titre, indispensable. Enfin, l'innovation devra aussi concerner l'étape de mise en place des plants sur le terrain (travail du sol, plantation, entretiens).

Ce plan de reboisement marque une rupture réelle, par rapport aux objectifs et aux modalités de la gestion forestière pratiquées pendant les 30 dernières années sur une large partie du territoire métropolitain. Toutefois, son lien aux nouveaux enjeux de la bioéconomie est assez direct. Le choix des espèces retenues, des itinéraires sylvicoles et de la cible foncière peut également être envisagé dans une perspective intégrée d'adaptation au changement

climatique (gain de flexibilité par les horizons rapprochés, diversification et reconversion de massifs, productivité concentrée sur une fraction réduite de l'espace géré). Ces arguments constituent les éléments d'une pédagogie qui permettrait de surmonter des difficultés d'acceptation.

II. La prise en compte des effets d'une possible aggravation des effets du changement climatique à l'horizon 2050

Au-delà des effets que les options de gestion forestière pourraient avoir, il y a lieu de s'interroger sur le rôle que pourraient jouer des facteurs essentiels, comme une accentuation du changement climatique, sur les peuplements forestiers et l'évolution de la ressource et de ses usages au cours des décennies à venir.

Initialement, deux scénarios climatiques, s'appuyant sur les trajectoires de forçage radiatif définies par le GIEC avaient été retenus : le RCP 2.6 est une trajectoire considérée comme une trajectoire « réaliste-optimiste » susceptible de limiter le réchauffement planétaire à 2° C en 2100 ; et, le RCP 8.5 correspondant à une trajectoire « réaliste-pessimiste » qui pourrait conduire à un réchauffement global compris entre 2.6°C . 4.8°C. L'analyse des dynamiques forestières obtenues en sortie du modèle GO+ avec les conditions climatiques issues des RCP 2.6 et RCP 8.5, a mis en évidence une faible « discrimination » des trajectoires à l'horizon 2050 entre ces deux trajectoires climatiques, les écarts se faisant plus sensibles au-delà et notamment à l'horizon 2100. Néanmoins, ces deux trajectoires climatiques, comparées au maintien du climat actuel, dégraderaient, selon les résultats du modèle GO+, la dynamique forestière obtenue en sortie du modèle MARGOT.

Sur ces bases, il a été convenu qu'en vue de contraster les résultats selon deux scénarios climatiques très marqués, on conserverait comme conditions climatiques de base, le « climat actuel » qui, dans le modèle MARGOT, s'appuie sur toute la période 2003-2013. Ainsi, le « climat actuel » tel qu'il se décrit au travers des séries 2003-2013 est déjà un climat quelque peu dégradé avec une succession d'années sèches comme la suite des épisodes secs des années 2003 à 2006. Retenir comme climat de référence le « climat actuel » (climat moyen sur la période 2003-2013), inclut donc déjà des éléments de changement climatique. Ce climat a été contrasté avec une option d'accentuation des effets du changement climatique en s'appuyant sur les résultats proposés par le modèle GO+ avec l'option alternative du RCP 8.5 (cf. Annexe 7, pp. 1-3).

Compte tenu de la faible discrimination des résultats obtenus avec le modèle biophysique GO+ entre un climat issu du RCP 2.6 ou du RCP 8.5 avant 2050, il n'a pas semblé utile, dans cette étude, de retenir ces deux trajectoires pour scénarios climatiques. En revanche, il a été considéré comme indispensable de contraster les résultats obtenus sous climat actuel avec ceux obtenus avec un climat encore plus dégradé, notamment de type RCP 8.5, et ses effets sur la croissance forestière telle que décrits par le modèle GO+.

III. Mode d'implémentation des scénarios et démarche de simulation

Pour étudier au mieux les effets sur les composantes du bilan carbone de la filière de chacun des trois scénarios de gestion placés chacun dans deux options climatiques différentes, on a combiné, comme évoqué précédemment, plusieurs outils de modélisation. Ceux-ci ont vocation, en intégrant une partie (et une partie seulement) des hypothèses constitutives des scénarios de gestion, à projeter jusqu'à l'horizon 2050 les données essentielles pour établir le

bilan carbone des différents leviers d'atténuation de la filière forêt-bois (accroissement de la biomasse en forêt, bois mort, volumes récoltés répartis selon les différents usages du bois).

Il va de soi que toutes les évolutions contenues dans la description des scénarios de gestion ne peuvent être transcrites en modification de variables d'entrée des modèles. Seules certaines d'entre elles ont pu être prises en compte. L'une des limites essentielles, sur laquelle on reviendra plus loin, est la difficulté qu'il y a eu, avec les outils actuellement disponibles, à faire évoluer de façon conséquente (et en alignement avec l'esprit des scénarios) la répartition des usages entre BO, BI et BE. Les conséquences de cette limite sur le stockage dans les produits bois et sur les effets de substitution seront discutées plus avant.

III.1. Détermination des niveaux de prélèvements

En « climat actuel », la simulation de la dynamique forestière selon les trois scénarios de gestion a été principalement basée sur le modèle démographique de l'IGN, MARGOT (*Matrix model of forest Resource Growth and dynamics On the Territory scale*) (cf. [Annexe 12 pp. 5-10](#)). Celui-ci permet en effet une analyse fine de la dynamique de la ressource sur la base des taux de croissance observés au cours de la période 2003-2013, les niveaux de prélèvement pouvant y être fixés de diverses façons :

- Variable-clé de distinction entre les différents scénarios, ces taux de prélèvements ont ainsi été maintenus constants par rapport à la période antérieure dans le cas du scénario « Dynamiques territoriales » : on s'appuie alors directement sur les taux de prélèvements déjà intégrés dans MARGOT à partir des données historiques.
- Ils ont été revisités dans le cas du scénario « Intensification et augmentation des prélèvements » afin de les augmenter en cohérence avec le comportement connu des acteurs et la possibilité de récolte supplémentaire selon les types de forêts. L'intensification a été déterminée par compartiment combinant type de propriété, région essence et catégorie de diamètre, en visant essentiellement une augmentation des prélèvements dans les forêts privées et communales, les feuillus et les gros bois de résineux.
- Le cas du scénario « Extensification » est un peu particulier, le maintien global des volumes prélevés en forêt a pu faire l'objet d'une simulation par le modèle économique FF5M, dont les résultats ont servi de base à la ventilation de ce niveau de prélèvement dans les strates de MARGOT.

Reportés en [Figure 3.4](#), les niveaux de prélèvements auxquels cette méthode aboutit, augmentent bien de façon claire avec l'intensification de la gestion forestière. Ils sont ainsi, à l'horizon 2050 et dans le scénario « Extensification » très proches de ceux d'aujourd'hui en matière de feuillus et même un peu en-deçà en matière de résineux. Ils augmentent de près de 40 % et 20 % respectivement pour les feuillus et les résineux pour le scénario « Dynamiques territoriales ». L'écart est encore plus manifeste quand on passe au scénario « Intensification » : l'augmentation des prélèvements est autour de 70 % pour les feuillus et dépasse les 50 % en résineux par rapport à la période initiale (2016-2020).

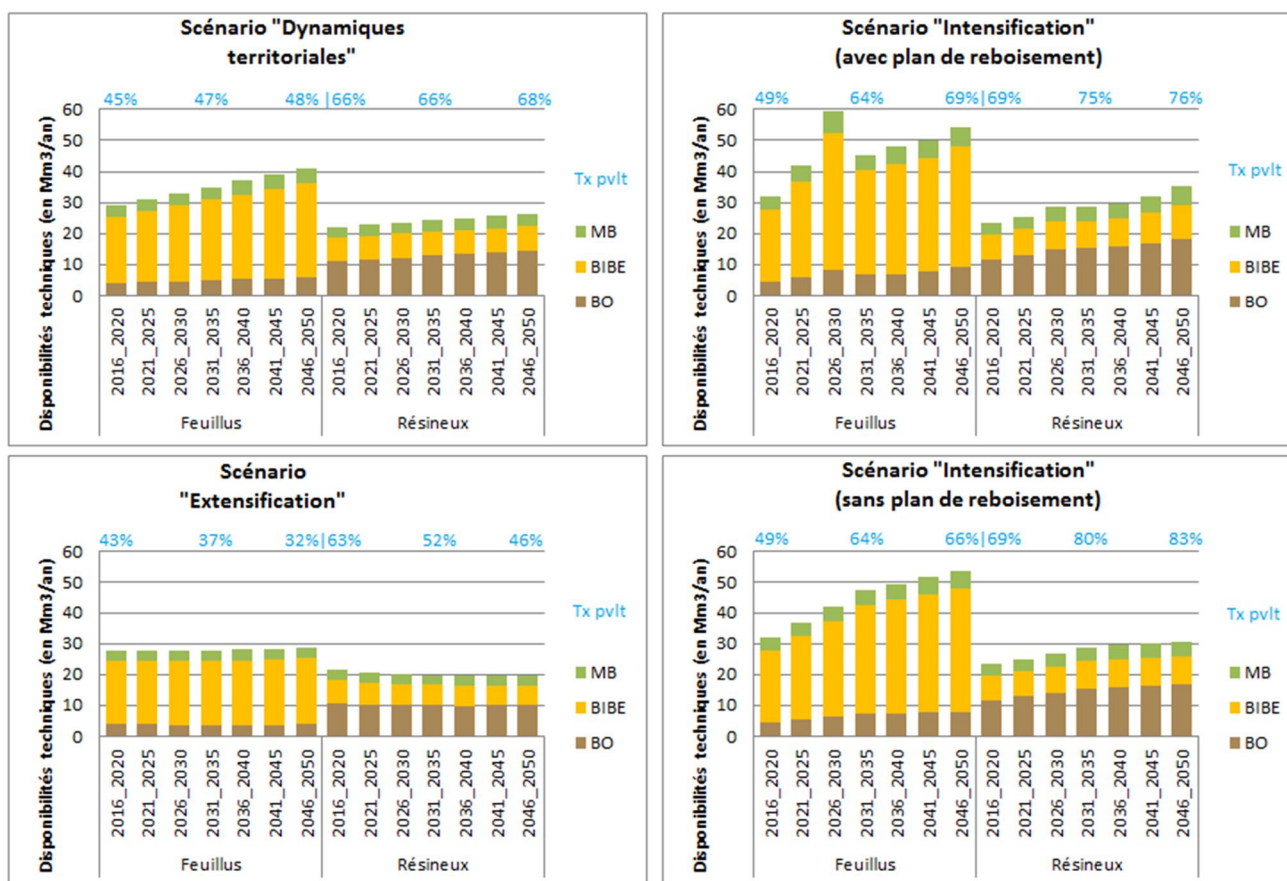


Figure 3.4 : Evolution des disponibilités techniques et du taux de prélèvement (en % de l'accroissement net) selon le scénario de gestion

III.2. Modification des paramètres de dynamique forestière en cas d'aggravation des effets du changement climatique

L'impact d'un changement climatique aggravé (RCP 8.5) sur les dynamiques forestières (croissance et mortalité) a été intégré au modèle de ressource MARGOT, d'une part, par la mobilisation du modèle GO+ et, d'autre part, avec les données du réseau systématique de surveillance de la forêt pour la quantification des effets sécheresse (cf. Annexe 12 p.10).

Représentant les principaux processus biophysiques et biogéochimiques d'un écosystème forestier pour les principales espèces forestières de production que sont *Pinus*, *Fagus*, Douglas, le modèle GO+ de croissance, de production et de gestion forestière permet la prise en compte de modifications de conditions notamment climatiques dans l'analyse des dynamiques forestières. Les anomalies de croissance que GO+ met en évidence avec des conditions climatiques dégradées (scénario RCP 8.5), ont été introduites dans le modèle MARGOT pour en modifier les paramétrages qui sont basés uniquement sur données historiques (cf. Annexe 7 pp. 7-12). Comme toutes les espèces forestières françaises ne sont pas modélisées dans GO+, une transposition des résultats d'une espèce à une autre a été nécessaire : seules les données disponibles pour les trois essences (Hêtre, Pin maritime et Douglas) qui font l'objet de calibration robuste, ont pu être mobilisées sans, pour autant, que ces essences puissent être considérées comme représentatives. Ainsi, les résultats obtenus à partir du modèle « Hêtre » ont été utilisés pour tous les feuillus, ceux du « Pin maritime » pour tous les pins et ceux du « Douglas » pour tous les autres résineux.

En complément des effets du climat sur la croissance des arbres, on a pris en compte les effets de la sécheresse sur la mortalité (cf. [Annexe 7 pp. 13-14](#) ; [Annexe 8](#)). La sécheresse fait référence à un déficit hydrique extrême (de type 2003) ou à des déficits récurrents sur plusieurs années successives. Dans ce cas, les capacités de régulation des arbres sont dépassées et des dysfonctionnements irréversibles peuvent apparaître : embolie de certains organes, mortalités de branches, pertes foliaires traduisant souvent une phase de dépérissement avec, dans les situations extrêmes comme 1976, 1989-1991 ou 2003, une surmortalité d'arbres (Bréda *et al.*, 2006). L'impact de la sécheresse est quantifié dans l'option climatique de type RCP 8.5 en termes de mortalité additionnelle à partir des observations passées enregistrées depuis 1989 sur le réseau systématique de surveillance de la forêt (ICP Forest, 1989-2015, level I). La densité du réseau d'observation a permis d'évaluer la mortalité additionnelle en distinguant seulement les feuillus des résineux. (cf. [Figure 3.5](#)).

Cette mortalité additionnelle est intégrée sans distinction spatiale ni temporelle. En effet, en analysant la fréquence d'années présentant une sécheresse égale ou supérieure à celle de 2003 (sécheresse exceptionnelle) sous forçage climatique de type RCP 8.5, il apparaît que, dès la première période de la projection, une sécheresse d'intensité supérieure ou égale à celle de 2003 est observée dans plus de 90 % des cas avec une récurrence quasi systématique sur plusieurs années. La mortalité additionnelle ajoutée à la mortalité calculée par l'IGN, sur les arbres adultes de bois moyens et gros bois seulement et pour chaque année des projections MARGOT, est ainsi de 0,13 pour les feuillus et de 0,76 pour les résineux.

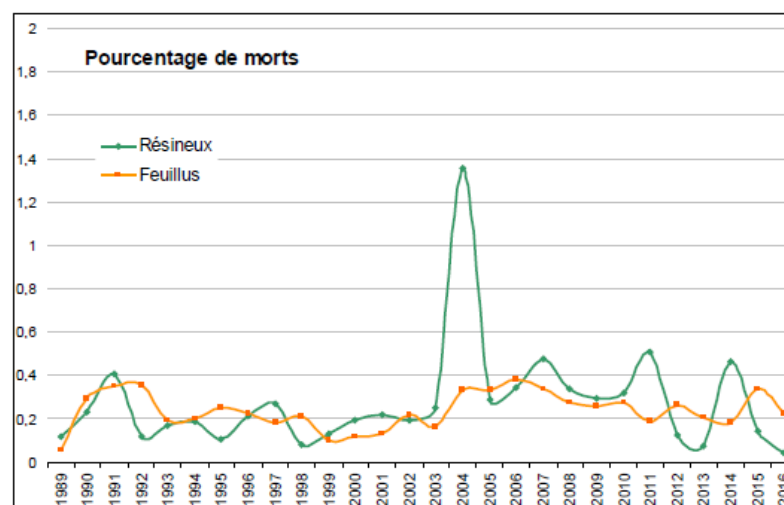


Figure 3.5 : Taux de mortalité d'arbres sur le réseau systématique depuis 1989
(Source : Département Santé de la Forêt, Goudet 2017)

IV. Analyse des résultats obtenus pour les différentes composantes du bilan carbone

IV.1. Dynamique forestière et analyse des évolutions (2016-2050) des composantes du bilan carbone selon les scénarios de gestion et les scénarios climatiques

Les effets des trajectoires décrites ci-dessus sur les différentes composantes du bilan carbone de la filière forêt-bois française ont été simulés jusqu'à l'horizon 2050 à l'aide du modèle de ressource de l'IGN, MARGOT. Le modèle MARGOT fournit des résultats (stocks sur pied,

disponibilité, accroissement, mortalité) qui, complétés par les modèles simples de dynamique pour le bois-mort, les effets de substitution des différents produits décrits au chapitre I, permettent d'établir pour chaque scénario les différentes composantes du bilan carbone. Ces bilans comportent 7 composantes : 5 stockages au sens strict (dans l'écosystème forestier : biomasses de feuillus et de résineux, bois-mort et sol (cf. Annexe 13 pp. 3-5) ainsi que dans les produits bois (cf. Annexe 13 pp.10-12)) et 2 effets de substitution (quantités d'émissions annuelles de CO₂ évitées par l'usage du bois de préférence à des procédés alternatifs plus émetteurs (cf. Annexe 13 pp.17-19) pour, respectivement, les usages en énergie et en matériau. Par stockage, on entend ici la variation d'un stock sur une année, indépendamment de la plus ou moins grande intensité des échanges instantanés entre ce stock et l'atmosphère. Une valeur négative, pour l'une des composantes, signifie que le stock considéré s'est amoindri au cours de l'année. La somme de ces sept composantes représenterait le bilan cumulé de la forêt et de la filière forêt-bois, vu depuis l'atmosphère au pas de temps annuel.

IV.1.1. Stock de bois, disponibilités et stockage de carbone dans l'écosystème

Les scénarios simulés prolongent la tendance à l'accumulation de bois observée depuis la statistique Daubrée de 1908, de manière plus ou moins prononcée selon le scénario de gestion. Le scénario « Extensification » entraîne, comme attendu, une très forte capitalisation, le volume sur pied atteignant 4 500 millions de m³ de bois fort tige en 2050 (cf. Figures 3.6.a et 3.6.b). Le scénario d'intensification prévoit des prélèvements plus élevés notamment dans les gros bois et par l'introduction d'un plan de reboisement qui consiste d'abord à couper les peuplements à reboiser. Malgré le caractère très énergique de ces pratiques de récolte, le stock sur pied continue d'augmenter jusqu'à 3 600 millions de m³ de bois fort tige en 2050, ce qui souligne la force et l'inertie de la tendance actuelle à la capitalisation. L'augmentation du stock concerne essentiellement les feuillus et la forêt privée. Dans les 3 scénarios de gestion, le volume de gros et de très gros bois augmente fortement, y compris dans le scénario "Intensification" où l'effort de récolte est pourtant concentré sur eux. En termes de stocks et de disponibilités, la mise en œuvre d'un plan de reboisement progressif de 500 000 ha étalé sur 10 ans se traduit par un pic de récolte pendant la décennie de coupes rases, alors que le surplus de disponibilité lié aux nouvelles plantations n'arrive que progressivement et n'est sensible qu'au-delà de 2050 (p. 40 de ce rapport).

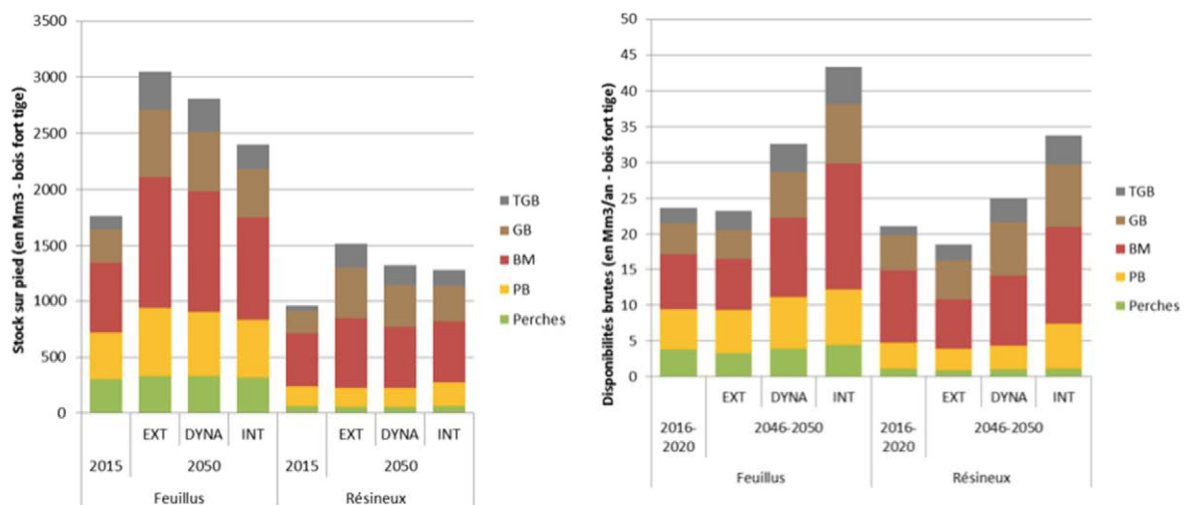


Figure 3.6.a. Répartition du stock sur pied et des disponibilités par type de propriété selon le scénario de gestion en 2015 et 2050 (en Mm³/an, BFT)

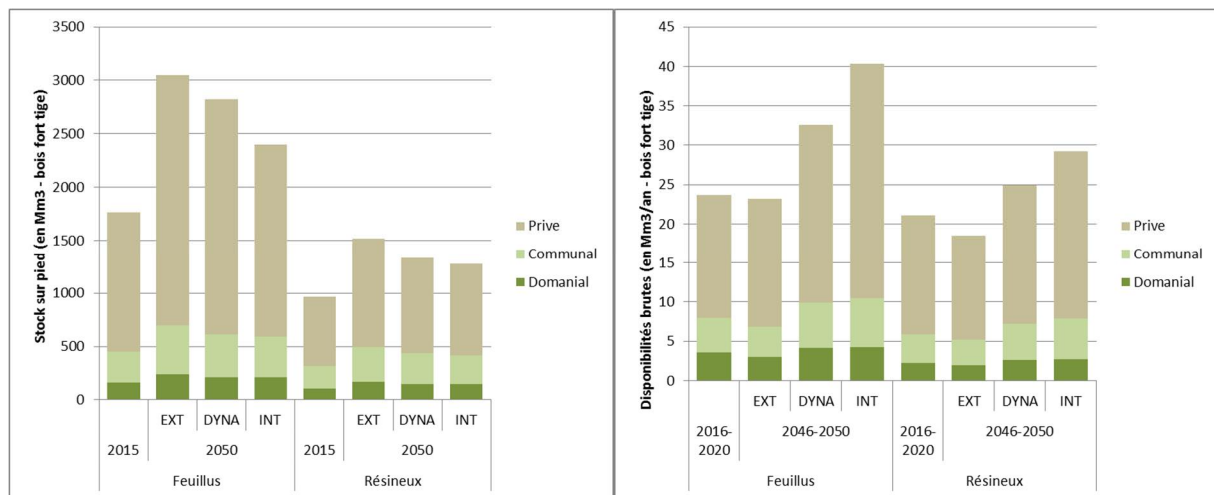


Figure 3.6.b. Répartition du stock sur pied et des disponibilités par catégories de grosseur selon le scénario de gestion en 2015 et 2050 (en Mm³/an, BFT)

Sous « climat actuel », la production biologique des feuillus suivrait une tendance à la hausse du fait de la relative jeunesse des peuplements : de 90 millions de m³/an (volume aérien total), elle progresserait jusqu'à 110 à 130 millions de m³/an en 2050 selon le scénario de gestion. Liée à l'arrivée en production de vastes surfaces jeunes, cette progression signifie une accélération du phénomène de capitalisation quel que soit le mode de gestion mis en œuvre. Sous l'option climatique RCP 8.5, le forçage, introduit depuis GO+ dans le modèle MARGOT, fait apparaître un plafonnement de la production biologique des feuillus, tandis que celle des résineux reste en légère progression (approximativement de 45 à 55 millions de m³/an, volume aérien total). Cette plus grande stabilité résulte de la combinaison de 2 tendances opposées : poursuite de l'expansion démographique et climat de plus en plus contraignant. Par conséquent, si les effets du changement climatique tendaient à se renforcer, la capitalisation se poursuivrait, mais sans accélération. L'évolution fortement négative, après 2050, des tendances de productivité issues de GO+ laissent présager une aggravation de la situation au-delà de l'horizon temporel de notre étude.

Ces résultats peuvent amener à penser (i) qu'il y aurait place pour une politique forestière dynamique compte tenu de la dynamique actuelle d'accumulation, (ii) que celle-ci serait compatible avec le maintien d'un important stock de gros bois (avec la biodiversité qui leur est associée), et (iii) que l'aggravation des effets du changement climatique pourrait accroître la vulnérabilité de la forêt française dès l'horizon 2050.

Sur ces bases, le stockage annuel dans l'écosystème (biomasse, bois-mort et sol), actuellement proche de 90 MtCO₂ eq/an (cf. Chapitre I), pourrait diverger fortement entre les 3 scénarios de gestion : en progression régulière jusqu'à 140 MtCO₂ eq/an dans le cas du scénario « Extensification », il pourrait être en très légère augmentation pour le scénario « Dynamiques territoriales » et en légère diminution dans le scénario « Intensification » qu'il soit implémenté avec ou sans plan de reboisement (cf. Figure 3.7).

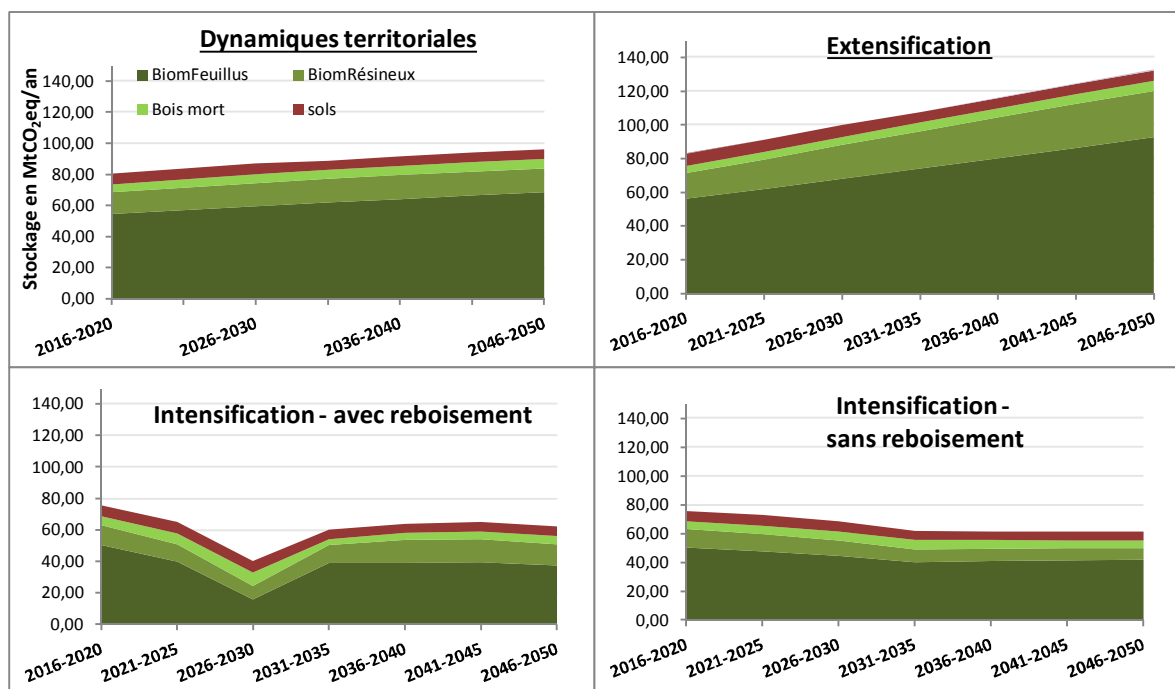


Figure 3.7 : Evolution du stockage annuel de carbone dans l'écosystème forestier français sur la période 2016-2050, selon les trois scénarios de gestion, en climat actuel et sans crise (en MtCO₂eq/an)

Lorsque, dans ce dernier scénario, on prend en compte le plan de reboisement, la perte induite par la concentration des coupes rases entre 2021 et 2030 est rapidement compensée dans les décennies suivantes. En revanche, l'horizon 2050 est trop proche pour que puissent apparaître les bénéfices de ces nouvelles plantations sur le stockage annuel de carbone. Comme on l'a vu plus haut, ces bénéfices n'apparaîtraient vraiment qu'après 2050 et culmineraient vers 2070. Le faible gain de ces plantations est également lié aux critères retenus pour élaborer le plan de reboisement. En imposant une forte contrainte d'accessibilité et se concentrant sur les peuplements en impasse sylvicole (cf. Annexe 6 pp. 8-14), il n'a pas obligatoirement concerné les surfaces les moins productives et a rendu l'objectif de +10 m³/ha/an difficilement atteignable.

Avec l'option climatique RCP 8.5, on constate une forte réduction des vitesses de stockage (l'écart avec les vitesses de stockage en climat actuel est proche de 40 % à l'horizon 2050), le stockage annuel dans l'écosystème forestier restant néanmoins toujours positif (cf. Figure 3.8). Les différences entre scénarios de gestion s'atténuent quelque peu, l'ordre étant néanmoins conservé : le rythme de croissance du stockage annuel serait ainsi très fortement ralenti dans le scénario « Extensification », il décroîtrait légèrement dans le scénario « Dynamiques territoriales » et sa chute serait un peu plus accentuée dans le scénario « Intensification ». Le stockage cumulé sur toute la période 2016-2050 diminuerait de 27 % pour les scénarios « Extensification » et « Dynamiques territoriales » et de 33 % pour le scénario « Intensification » (cf. Figure 3.9).

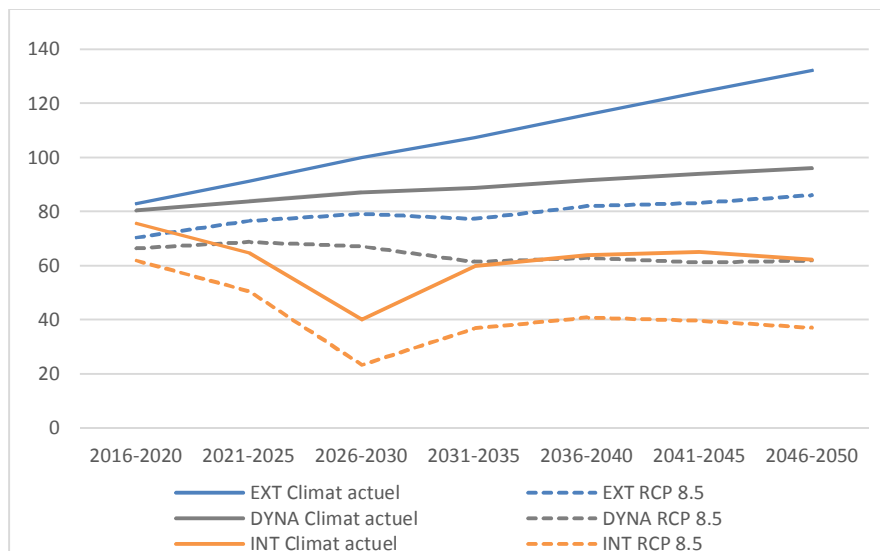


Figure 3.8 : Stockage annuel du carbone dans l'écosystème forestier sur la période 2016-2050, selon les trois scénarios de gestion et les deux scénarios climatiques (en MtCO₂ eq/an).

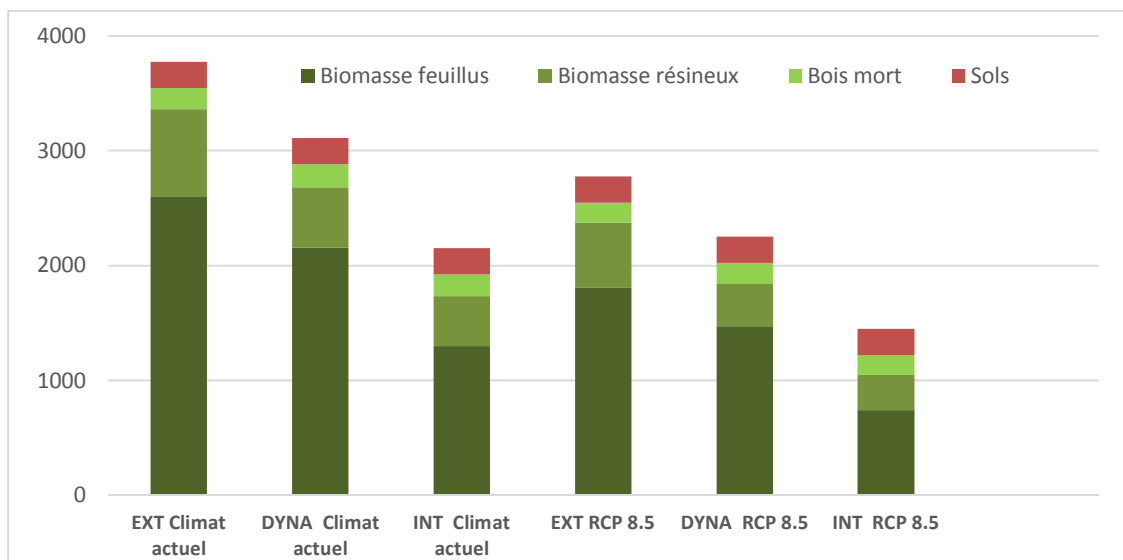


Figure 3.9. : Stockage de carbone dans l'écosystème forestier cumulé sur la période 2016-2050, selon les trois scénarios de gestion et les deux scénarios climatiques (en MtCO₂ eq).

Ainsi, cumulé sur la période 2016-2050, le stockage dans les écosystèmes varierait, selon les scénarios de gestion, entre 2 100 et 3 700 MtCO₂ sous climat actuel, et entre 1 500 et 2 800 MtCO₂ en cas d'aggravation des effets du changement climatique (RCP 8.5). Ces ordres de grandeur indiquent tout d'abord que les écosystèmes forestiers, sans même tenir compte de la transformation du bois et des comparaisons intersectorielles, resteront en toute hypothèse un contributeur majeur au bilan national de GES jusqu'à l'horizon 2050. Mais l'intensité de cette contribution du stockage dans les écosystèmes sera très dépendante de la combinaison entre les modes de gestion et mobilisation du bois et les effets dépressifs d'un renforcement de l'action du climat.

IV.1.2. Quelle information apporterait une version « densité-dépendante » de MARGOT ?

Les dynamiques commentées ci-dessus mettent en lumière que la forêt française n'est pas dans une situation d'équilibre et suit une tendance d'augmentation du capital sur pied. Néanmoins, avec la spécification actuelle des outils disponibles, dont on a déjà souligné la robustesse pour des horizons de projection proches (2030-2035) mais les potentielles limites pour des projections plus lointaines, celle-ci suivrait un *trend* continu de croissance peu compatible avec ce que l'on sait de la possible limitation de celle-ci avec le vieillissement des peuplements forestiers. Ce constat nous a conduits à tester une meilleure prise en compte des états de compétition intra-peuplement qui tendraient à s'accroître à mesure que les peuplements se densifieraient. En effet, une des limites à long terme du modèle MARGOT est que la calibration des paramètres de dynamique (croissance, mortalité, etc.) repose sur des données d'observation associées à un contexte donné, celui actuellement en place. Grâce au traitement par stratification (domaine géographique, propriété, essences), le paramétrage de MARGOT reflète toutes les nuances de la dynamique forestière imputables aux microclimats, aux sols, aux sylvicultures locales. Mais, si ce contexte change dans le temps (augmentation forte du volume sur pied, modification des facteurs environnementaux, changement de pratiques sylvicoles, etc.), les paramètres dynamiques devraient également évoluer, ce qui n'est actuellement pas modélisé et simulé. C'est pourquoi le domaine d'utilisation de MARGOT, dans sa forme actuelle, est restreint à des projections de court et moyen terme.

Or, ce sont précisément des variations concomitantes du climat et des pratiques que nous souhaitons explorer ici, et l'horizon 2050 est manifestement trop éloigné pour qu'on puisse supposer la non-stationnarité des matrices de transition. L'IGN a engagé des travaux de recherche, au sein de son Laboratoire de l'Inventaire Forestier à Nancy, afin d'apporter une réponse robuste à cette question. Pour les besoins de la présente étude, l'IGN a ajusté une version densité-dépendante de MARGOT qu'il faut considérer comme provisoire. Le paramètre de croissance (transition entre classes de diamètres) a été rendu dépendant de la densité relative des peuplements, de façon à respecter une loi de saturation de la production à l'échelle du peuplement (cf., pour plus de détail, [Annexe 12, pp. 28-30](#)).

L'introduction de cette dépendance à la densité dans les simulations se rapporte à une phase possible d'analyse de sensibilité des résultats précédents. Les évolutions de la capacité de stockage de la forêt française se trouvent largement modifiées (cf. [Figure 3.10](#)). Sans changer la hiérarchie des scénarios, l'écart entre eux se resserre fortement : la progression de la vitesse annuelle de stockage ne serait plus que de 25 % (contre 60 % précédemment) dans le scénario « Extensification » entre 2016 et 2050 ; la vitesse de stockage resterait stable avec le scénario « Dynamiques territoriales » et sa chute serait légèrement plus accentuée dans le scénario « Intensification ».

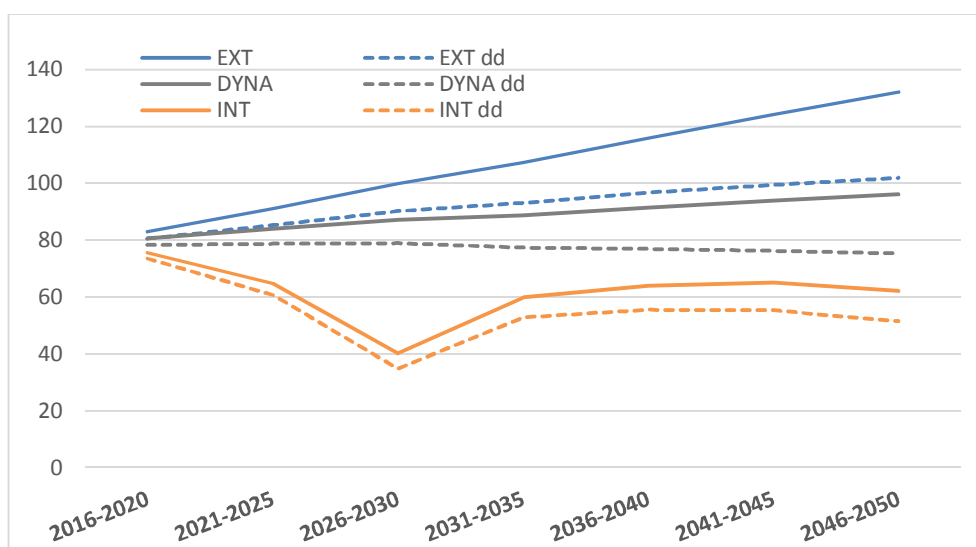


Figure 3.10 : Stockage annuel de carbone dans l'écosystème forestier sur la période 2016-2050, en Climat actuel et selon les 3 scénarios de gestion, avec test de l'introduction d'une densité dépendance (dd) dans le modèle MARGOT (en MtCO₂ eq/an).

IV.1.3. Devenir de la récolte, ventilation par usages (BO, BI, BE) et stockage dans les produits-bois

La quantité de bois valorisable par la filière est estimée par différence entre le volume aérien total et les menus bois. Ce volume a été séparé en trois usages principaux : le bois d'œuvre (BO), le bois d'industrie (BI) et le bois énergie (BE). Les usages des bois (et non leur qualité potentielle) dépendent très fortement de la demande provenant de la filière. Celle-ci a pu être analysée dans le cas du scénario « Extensification », qui consiste à figer les usages actuels, via le modèle économique FFSM et appliquée à chacun des scénarios (cf. [Annexe 12, pp. 12-13](#) et [Annexe 14, pp. 11-12](#)). Une telle démarche n'a pas été menée dans le cas du scénario « Dynamiques territoriales » compte tenu de sa caractéristique de poursuite des tendances actuelles et n'a pu aboutir pour le scénario « Intensification » compte tenu de certaines des limites actuelles de FFSM (cf. [Annexe 14](#)).

Les volumes de bois entrant dans la filière différencient fortement les scénarios entre eux. Maintenus presque constants aux environs de 40 Mm³/an pour le scénario « Extensification » en climat actuel, ils passent à près de 60 Mm³/an dans le scénario « Dynamiques territoriales » et dépassent les 70 Mm³/an dans le scénario « Intensification » (cf. [Figure 3.11](#)). En cas d'aggravation du changement climatique (RCP 8.5), ces volumes évolueraient peu : ils resteraient identiques à ce qu'ils seraient en climat actuel pour le scénario « Extensification » et baisseraient de moins de 10 % pour les deux autres. En effet, les dynamiques de stockage en forêt et de récolte de bois mûrs sont assez indépendantes sur un pas de temps relativement court de 35 ans.

Contrairement à la logique de certains des scénarios, la ventilation entre types d'usage (BO, BI et BE) n'a pas pu être différenciée selon la trajectoire : quels que soient le scénario de gestion et le scénario climatique, c'est environ 38 % des usages qui restent destinés au bois énergie, 28 % au bois d'industrie et donc un peu plus du tiers au bois d'œuvre. Ainsi, à l'horizon 2050, la progression des récoltes est ici peu contrainte par l'état de la ressource, ni dans l'absolu ni dans sa ventilation par usage. Cette dernière gagnerait à découler d'une modélisation plus explicite, qui peut être, par exemple, un calcul optimal faisant correspondre

offre et demande que FFSM n'a pas été en mesure de proposer, compte tenu de certaines de ses limites méthodologiques actuelles.

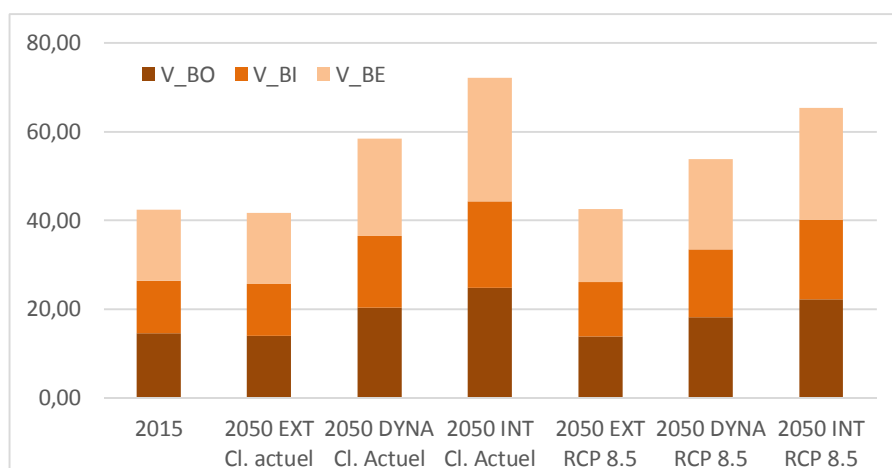


Figure 3.11 : Répartition des volumes de bois entrant dans la filière en 2015 et en 2050 selon les usages (BO, BI et BE) et les scénarios, climat actuel et RCP 8.5 (en Mm3)

Seuls les volumes de bois d'œuvre et de bois d'industrie font l'objet d'un stockage de leurs produits et le stockage net annuel doit tenir compte des pertes dues à la fin de vie des produits bois accumulés antérieurement. Rappelons que les stocks début de période ont été estimés à respectivement 300 MtCO₂eq et 80 MtCO₂eq pour le bois d'œuvre et le bois d'industrie, auxquels on a appliqué des demi-vies de respectivement 20 et 5 ans (cf. Chapitre I et Annexes 4 pp. 1-4 et 13 pp. 1-2).

Sous ces hypothèses, le stockage annuel dans les produits reste globalement faible et suit une progression dont la hiérarchie est conforme aux taux de prélèvements visés par chacun des scénarios. Quasiment nul sous « Extensification » (où le niveau absolu de prélèvement reste voisin de sa valeur actuelle), il est proche de 3 à 6 MtCO₂eq/an dans les 2 autres scénarios, pour lesquels ils seraient susceptibles de ralentir quelque peu, notamment en fin de période, en cas d'accroissement des effets du changement climatique (cf. Figure 3.12). Cette vitesse est, dans tous les cas, très faible par rapport au stockage dans l'écosystème.

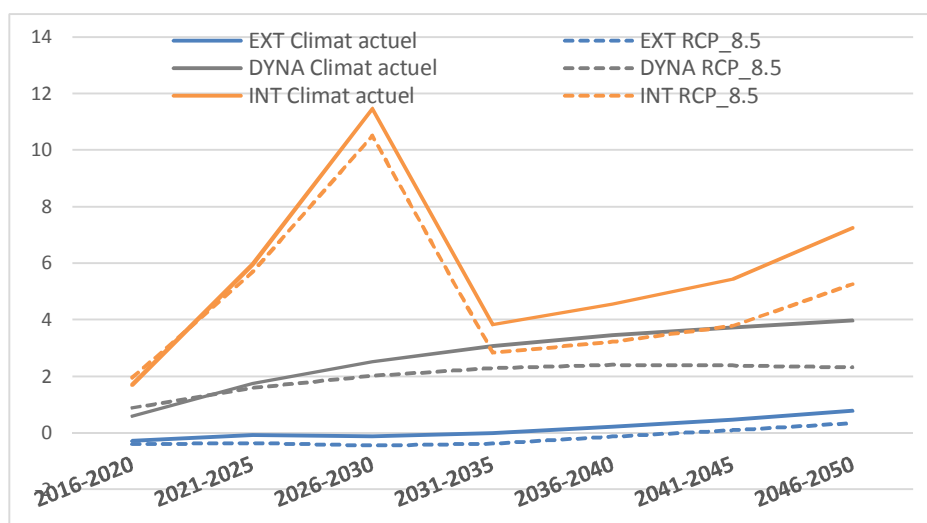


Figure 3.12 : Stockage annuel de carbone dans les produits de la filière bois française selon les trois scénarios de et les deux scénarios climatiques « Climat actuel » et « Climat RCP 8.5 » (en MtCO₂ eq/an).

Sans doute est-ce dû en partie aux hypothèses retenues : demi-vies, rendements à la transformation, ventilation par produits, devenir en fin de vie et recyclage, ainsi que leurs évolutions au cours du temps. Mais, la sensibilité du résultat à des écarts sur chacun de ces paramètres n'apparaît *a priori* pas très importante. C'est potentiellement plus à une modification combinée de ceux-ci qu'il faudrait procéder pour améliorer ce résultat : stimulation de la demande et structuration de l'offre pour augmenter la part du bois d'œuvre, évolution des types de produits s'orientant vers des produits à plus longue durée de vie, amélioration des technologies augmentant les rendements, etc. Cela mériterait d'être testé, par exemple, avec l'outil CAT développé par l'INRA de Nancy et l'AgroParisTech (Fortin *et al.*, 2012). Comme évoqué *supra* avec la densité-dépendance, il s'agirait de rendre explicite la dépendance de la dynamique de stockage par rapport au développement historique des usages et de la filière.

IV.1.4. Évaluation de l'ampleur des effets de substitution

Au vu du faible poids dans le bilan carbone du stockage dans les produits bois, c'est avant tout sur les effets de substitution que pèse la contribution des filières bois à ce bilan. Selon les hypothèses et le paramétrage retenus (cf. Chapitre I et Annexes 4 pp 4-17 et 13 pp 1-2), le niveau des émissions évitées liées à la substitution de produits fortement émetteurs est important et il est d'autant plus important que le niveau des récoltes s'intensifie. En climat actuel, il reste constant aux environs de 36 MtCO₂ eq/an pour le scénario « Extensification » ; il augmente régulièrement jusque vers 50 MtCO₂ eq/an dans le scénario « Dynamiques territoriales » (cf. Figure 3.13).

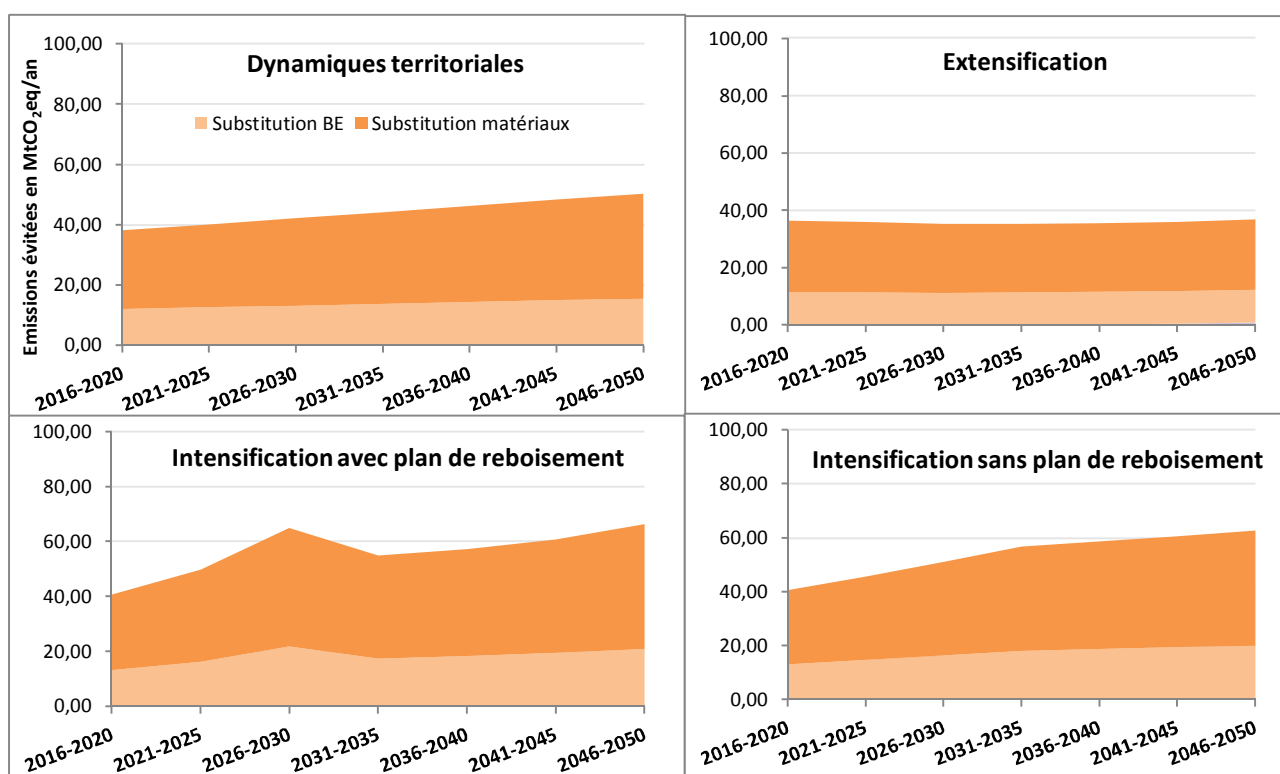


Figure 3.13 : Evolution des émissions de CO₂ évitées par effet de substitution dû à l'usage des produits bois, sur la période 2016-2050, selon les trois scénarios de gestion, en climat actuel et sans crise (en MtCO₂ eq/an)

Du fait de la mise en œuvre du plan de reboisement, ce niveau d'émissions évitées est plus variable dans le temps dans le scénario « Intensification » : après un pic aux environs de 65 MtCO₂ eq/an pour la période 2026-2030, il reprend une progression continue de 52 à 66 MtCO₂ eq/an de la période 2031-2035 à la période 2046-2050. La comparaison entre la simulation faite avec plan de reboisement et sans plan de reboisement met en lumière l'impact de celui-ci sur les émissions évitées. En effet, sans plan de reboisement, la progression des émissions évitées suit jusqu'en 2035 l'augmentation des taux de prélèvements, elle devient ensuite beaucoup plus lente du fait de la stabilité des taux de prélèvements. A l'inverse, le plan de reboisement dont les plantations commencent à entrer en production à la fin de la période étudiée, permet une augmentation de 25 % des émissions évitées entre 2030 et 2050, progression principalement concentrée sur les bois d'œuvre et bois d'industrie.

Logiquement, compte tenu des coefficients de substitution attribués respectivement au BI-BO et au bois énergie et de la part de ce dernier dans les volumes entrant dans la filière, la substitution est principalement le fait des bois d'œuvre et bois d'industrie.

En cumul sur toute la période 2016-2050, les émissions évitées s'étagent entre 1 250 et 2 000 MtCO₂ eq selon les scénarios (cf. Figure 3.14). L'écart de 60 % que l'on peut relever entre le scénario « Extensification » et le scénario « Intensification avec plan de reboisement » (en climat actuel) est, comme on le supposait, susceptible de compenser tout ou partie des différentiels de stockage en forêt que l'on a mis en évidence plus haut entre ces deux scénarios. Ce qui est plus significatif, c'est que ces émissions évitées seraient peu affectées par une aggravation des effets du changement climatique (RCP 8.5). Ainsi, les effets de substitution, plus robustes aux impacts du changement climatique que le stockage de carbone dans l'écosystème, permettraient d'atténuer plus facilement la baisse de la contribution à l'atténuation du changement climatique liée aux effets de celui-ci lorsque le mode de gestion forestière s'intensifie.

Le niveau des émissions évitées est néanmoins très dépendant des coefficients de substitution retenus ainsi que de la répartition entre usages des bois. Rappelons que les coefficients que nous avons retenus ici sont adaptés de Oliver *et al.* (2014) et Sathre et O'Connor (2010), ils sont de 0,5 tCO₂/m³ pour le bois énergie avec une plage de variation repérée dans la littérature allant de 0,37 à 0,64 (cf. Annexe 4, Tableau 4.3 p.17) alors qu'ils sont de 1,6 tCO₂/m³ appliqué de façon indifférenciée au BI et au BO, avec une plage de variation extrêmement importante allant de 0,59 à 3,47 (cf. Annexe 4, Tableau 4.2 p.16). On voit bien que le niveau global des effets de substitution tels qu'évalués ici, est extrêmement sensible à la valeur du coefficient de substitution retenu pour le bois-matériau, sachant que nous avons retenu une seule valeur de coefficient quel que soit le type d'usage en BO et BI et que nous avons maintenu cette valeur constante sur toute la période 2016-2050. Nos coefficients sont certes légèrement plus forts que ceux du projet ClimWood2030 (Rüter *et al.*, 2016) mais ils restent encore loin du niveau supérieur (tout autant qu'inférieur) des valeurs relevées dans la littérature. S'il avait été possible d'introduire, dans le scénario « Intensification », l'augmentation des valorisations en BO, cohérente avec la logique du scénario et si nous avions envisagé une différenciation des coefficients de substitution en faveur du BO, l'écart entre scénarios de gestion serait encore plus marqué en matière d'effets de substitution.

Par ailleurs, nous avons supposé constants dans le temps les coefficients de substitution affectés tant au BO-BI qu'au BE, n'ayant pas l'expertise technologique pour analyser rigoureusement la ou les façons dont les technologies en concurrence pourraient évoluer d'ici à 2050, sachant qu'une telle analyse, de nature prospective, se doit d'envisager simultanément l'évolution des technologies de production bois et des produits alternatifs ainsi

que l'émergence de nouveaux usages substitués à des produits fortement émetteurs de GES. On voit bien qu'il est particulièrement délicat de conclure à la hausse ou à la baisse des coefficients de substitution et qu'une analyse rigoureuse dans ce domaine devrait mettre à plat différentes options technologiques, leur capacité de réduction de leurs émissions par innovation incrémentale ou radicale ou le recours à des énergies plus renouvelables. Une telle démarche déboucherait forcément sur plusieurs scénarios d'évolution des coefficients de substitution argumentés sur des bases technologiques précises. Si, de leur côté, Rüter *et al.* (2016) tablent, dans le projet ClimWood2030, sur une réduction de 20 % des coefficients matériau entre 2010 et 2030, certaines options technologiques ou la prise en compte de la rareté des ressources primaires nécessaires à certains produits alternatifs (sable pour la production de béton, par exemple) pourraient amener à nuancer, voire inverser, cette hypothèse.

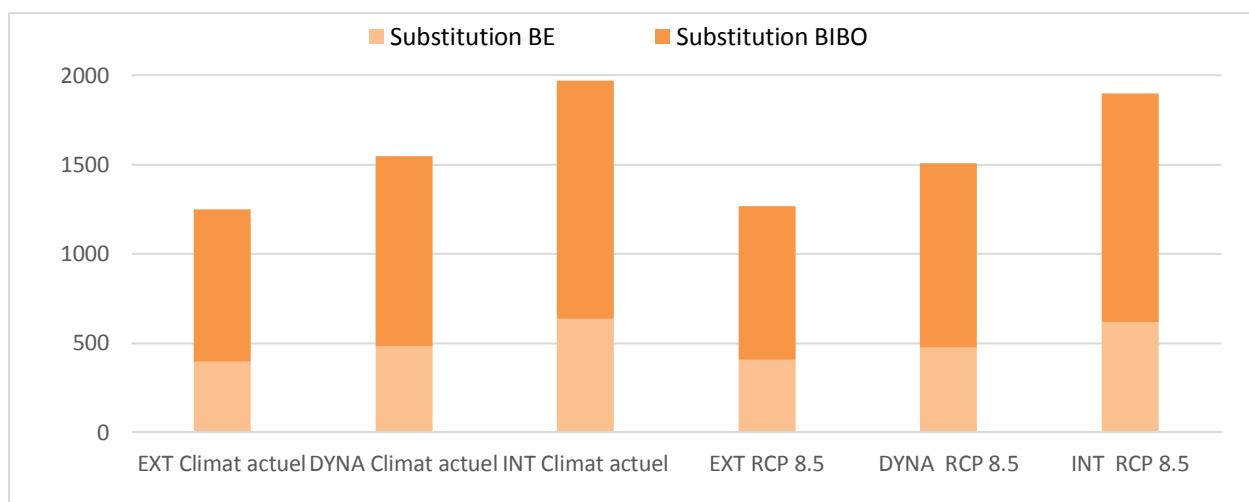


Figure 3.14 : Emissions de CO₂ évitées par effet de substitution en cumul sur la période 2015-2050 selon les trois scénarios de gestion, en climat actuel et en climat RCP 8.5 (en MtCO₂ eq)

En outre, nos scénarios d'intensification des usages de la ressource sont conçus autour d'une mobilisation croissante des bois feuillus en construction, ce qui devrait avantager spécifiquement la filière forêt-bois française : la densité du bois des feuillus est supérieure d'environ 20 % à celle des résineux, il en est de même pour le coefficient de substitution exprimé en tCO₂/m³. Par conséquent, même si on peut spontanément penser à une diminution des coefficients de substitution bois-matériau, une augmentation de ceux-ci pour tout ou partie des matériaux bois n'est pas à exclure.

En ce qui concerne l'énergie, en considérant un contexte dans lequel le Peak Oil est dépassé, les nouvelles ressources en pétrole auraient un coût environnemental croissant, tandis que le gaz resterait stable à cet égard et que le charbon demeurerait toujours très peu utilisé en France. Ce serait donc une relative stabilité, voire une augmentation, que l'on pourrait escompter pour le coefficient de substitution bois-énergie.

Compte tenu de tous ces éléments de discussion et de controverses, nous avons préféré, dans le cadre de cette étude et compte tenu des moyens qui y étaient affectés, nous limiter à un coefficient unique pour BO et BI (valeur centrale de la fourchette Sathre et O'Connor) et le maintenir constant dans le temps. A notre sens, il serait nécessaire, avant toute modification de ces coefficients, d'explicitier la manière dont ces effets de substitution, dont on voit l'importance dans la contribution de la filière à l'atténuation du changement climatique, sont liés aux technologies adoptées et à celles des industries concurrentes, celles-ci pouvant toutes

évoluer dans le temps de façon différenciée selon la logique des scénarios. Une meilleure représentation de la structure des usages (BE-BI-BO) et de la façon dont celle-ci est contrastée entre scénarios, prend ici tout son sens, sans doute plus encore que pour les stocks de bois. En effet, on constate depuis une dizaine d'années de fortes évolutions et fluctuations dans la manière dont les catégories de bois (espèce*grosueur) sont transformées par les différentes industries : le ratio entre les usages énergie et bois d'œuvre pour le hêtre en Allemagne se est ainsi très rapidement déplacé au profit de l'énergie ; à l'inverse, les nouveaux procédés de bois reconstitué permettent de valoriser en bois d'œuvre des billons de petit diamètre qui auraient été consommés comme bois d'industrie.

IV.1.5. Bilan de carbone des 3 scénarios de gestion sous climat actuel, comparaison entre la version actuelle du modèle MARGOT et sa variante densité-dépendante

Bien que risqué, à ce stade, compte tenu des incertitudes sur les coefficients de substitution, du caractère très imparfait et provisoire de l'introduction dans la simulation des effets du vieillissement des peuplements et de l'absence de contraste dans les usages entre nos scénarios, le bilan carbone des 3 scénarios de gestion au cours de la période simulée (2016-2050), cumulant les trois composantes analysées ci-dessus, est représenté à la Figure 3.15 pour deux versions du modèle MARGOT, l'une standard et l'autre densité-dépendante. Ceci permet d'apprécier des propriétés de monotonie, reports éventuels entre composantes et stabilité du système.

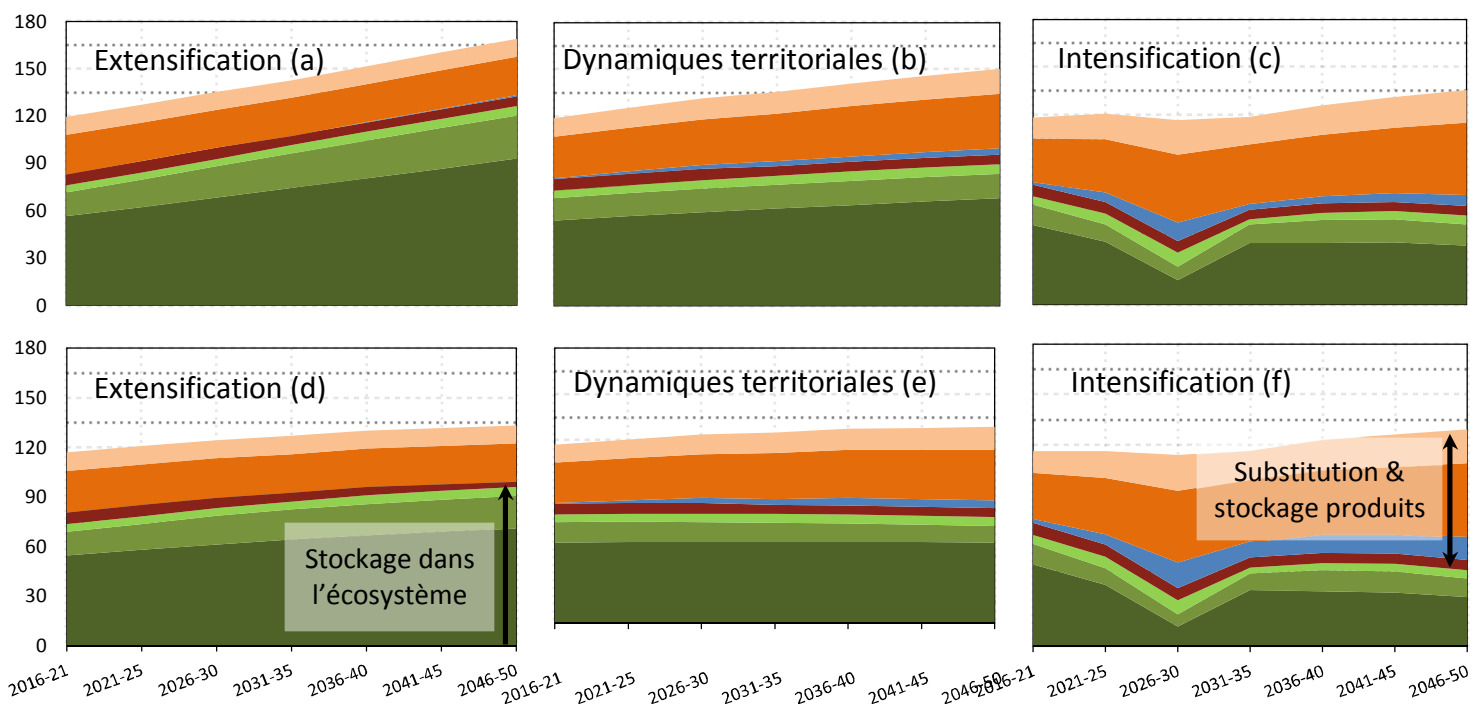


Figure 3.15. : Bilan carbone de la filière forêt-bois pour les 3 scénarios de gestion forestière avec la version actuelle du modèle MARGOT (a, b et c) et une variante (provisoire) densité-dépendante (d, e et f), sous climat actuel, en MtCO₂ eq/an

Le bilan de carbone varie entre 90 et 150 millions de tCO₂ équivalentes par an, ce qui est très conséquent lorsqu'on rapporte ce chiffre au total des émissions nationales (environ 350 MtCO₂ par an, cf. CITEPA, 2017). Deux résultats généraux ressortent clairement : (i) le bilan possède toujours un signe positif (la forêt de métropole a un impact favorable sur le bilan des émissions de GES et va le conserver dans une large gamme d'hypothèses d'ici 2050) ;

(ii) le bilan est croissant sur la période, éventuellement stationnaire. Il est fondamental de réaliser que ce dernier résultat n'est en rien une propriété intrinsèque de l'écosystème forêt, mais découle de deux particularités historiquement contingentes de cette ressource : les forêts françaises de métropole sont en majorité jeunes, héritées de la transition forestière démarrée vers 1830 et qui se poursuit aujourd'hui ; l'abandon du bois comme commodité centrale de notre économie (Dangerman & Schellhuber, 2013), qui a permis la recapitalisation des forêts, a entraîné un recours massif à des matériaux et procédés plus émetteurs de GES (carburants fossiles, béton, acier), ce qui, à rebours, confère à l'usage du bois un bénéfice environnemental *sui generis* (par substitution).

Ce caractère historique du puits de carbone forestier a deux importantes conséquences méthodologiques : (i) au-delà de la phase de recapitalisation des forêts, il n'y a pas de raison pour que les échanges de carbone entre forêts et atmosphère continuent de se solder par un fort puits forestier (les contraintes climatiques et les dégâts forestiers récurrents pourraient l'affaiblir, voire l'inverser) ; (ii) tout l'usage actuel des produits forestiers, sans même parler de ses évolutions attendues, peut être crédité d'effets de substitution (leur existence découle d'un arbitrage entre matériaux et procédés et, si l'arbitrage avait été davantage au bénéfice du stock forestier, on comptabiliserait bien sûr le surplus de stockage comme bénéfice climatique).

Avec la version actuelle du modèle MARGOT (cf. Figure 3.15., a, b, c), on remarque un comportement très tendu, quasiment linéaire, des différentes composantes du bilan de carbone. Seule la forte perturbation induite par les coupes préalables au plan de reboisement perturbe pendant quelques années ce comportement. Au contraire, avec la variante densité-dépendante (cf. Figure 3.15, d, e, f), on perçoit très nettement une inflexion dans le scénario « Extensification » (la forte densification des peuplements ralentit la croissance individuelle). Une autre différence notable entre les deux versions du modèle est que la version actuelle amplifie les différences au cours du temps, tandis que la variante densité-dépendante les atténue : ainsi, sous le scénario « Intensification », la moindre densité des peuplements stimule la croissance individuelle, ce qui permet une assez bonne conservation de la productivité au niveau du peuplement (Langsæter, 1941 ; Assmann, 1970 ; Houllier, 1991). Ainsi, le bilan de carbone des 3 scénarios de gestion obtenu avec la variante densité-dépendante évolue dans une gamme étroite ($\pm 10\%$) jusqu'en 2050, alors que la version actuelle les fait diverger fortement, à partir de la valeur initiale de 120 MtCO₂eq/an jusqu'à des valeurs en 2050 qui seraient entre 135 et 170 MtCO₂eq/an. Il y a là clairement matière à investigations scientifiques complémentaires tant pour préciser le rôle de la densité-dépendance et de la compétition entre individus dans les dynamiques de peuplement à des horizons plus lointains qu'à l'accoutumée que pour l'introduire de façon pérenne dans les modèles dynamiques de ressources forestières, tels que MARGOT.

Un dernier résultat, très important, découle de ces enjeux méthodologiques. Nous constatons que ce qui distingue fortement les 3 scénarios de gestion, ce n'est pas tant le bilan carbone total que la manière dont celui-ci se répartit entre stockage dans l'écosystème (labile), stock produits et émissions évitées (associés à la sphère économique et très largement pérennes) : le bilan 2050 pour « Extensification » est concentré à 71 % dans l'écosystème, contre 65 % dans la sphère économique pour « Intensification ». En d'autres termes, la baisse de vitesse de stockage constatée avec « Intensification », qu'on la regarde en tendance sur toute la période ou, plus ponctuellement, autour de 2030 avec la récolte très concentrée de vastes surfaces, est presque complètement compensée par les autres composantes du système, ici essentiellement le stock de produits et les effets de substitution. Dans une telle situation, on

peut imaginer que le choix politique ne porte pas tant sur le bilan carbone comparé de différentes options, mais tout autant sur la manière dont celui-ci se répartit entre ses composantes exposées ou non aux aléas, c'est-à-dire d'un certain point de vue sur la stabilité et la résilience des résultats attendus.

Ce résultat lui-même est sensible non seulement aux propriétés du modèle dynamique retenu, mais aussi à la pertinence des hypothèses et paramétrages retenus pour évaluer les différentes composantes du bilan carbone. L'analyse de sensibilité et les prolongements qu'il conviendrait maintenant d'envisager, porte *a priori* sur les dimensions suivantes du problème :

- Approfondir en priorité l'estimation des composantes les plus dominantes du bilan, à savoir la biomasse des feuillus, la substitution-matériau (y compris dans sa dimension de ventilation des produits entre usages BO/BI/BE) et le sol (pour lequel aucune différenciation entre scénarios de sa capacité de séquestration n'a été envisagée) ;
- Attribuer au sol une dynamique plus soigneusement modélisée, comportant des interactions explicites avec le climat, les changements de pratiques de gestion et leurs interactions ;
- Vérifier le comportement du système lorsqu'on fait varier les demi-vies du bois-mort et des produits et lorsqu'on accroît ou diminue la valeur de substitution des produits-bois ;
- Construire les hypothèses concernant les produits (stockage et substitution) à partir de représentations plus explicites portant soit sur le comportement des acteurs forestiers et premiers transformateurs (grâce à des évolutions de modèles de type FFMS), soit sur les flux de carbone dans la sphère économique (différentes étapes de transformation, recyclage, devenir en fin de vie).

IV.1.6. Conclusion sur les 6 scénarios de base croisant mode de gestion et changement climatique

Considérons d'abord l'évolution sous climat actuel, sans manifestation de crise (cf. Figure 3.15). Le contraste est bien marqué entre les 3 scénarios de gestion :

- Sous le scénario d'« Extensification », la quasi-constance des prélèvements au cours du temps a pour conséquence que les stocks de bois dans la filière et bénéfices de substitution sont invariants, tandis que les stocks sur pied de résineux et, surtout, de feuillus augmentent rapidement. La part du stockage-biomasse dans le total du bilan croît de 60 à 71 % en 34 ans, tandis que la part liée aux effets de substitution diminue de 31 à 20 %.
- Sous le scénario « Dynamiques territoriales », les composantes du bilan gardent les mêmes proportions au fil du temps, la part du stockage en biomasse restant constante à 57 % du stockage annuel total et celle liée aux effets de substitution restant à 33 %.
- Sous le scénario « Intensification avec plan de reboisement », la concentration d'une surface importante de coupes rases avant 2030 entraîne une baisse momentanée du stockage-biomasse, tandis que les stocks produits et effets de substitution compensent en partie. Le bilan consolidé reste à peu près stationnaire jusqu'en 2035, avant de repartir à la hausse ensuite.

Dans les 3 situations, les termes dominant le bilan sont d'abord le stockage forestier en feuillus, puis l'effet de substitution-matériaux, enfin le stockage forestier en résineux. Les autres termes du bilan, notamment stockage dans les produits bois ou le bois-mort, jouent un rôle mineur et interviennent comme stabilisateur, en raison des transferts entre compartiments.

Si nous considérons maintenant la projection des mêmes scénarios de gestion sous climat RCP 8.5 (cf. Figures 3.8, 3.9, 3.12 et 3.14 ainsi que Annexe 13, pp. 5, 12 et 19), on note une quasi constance du bilan carbone sur la période simulée. Cette constance résulte, elle-même, de la combinaison entre un facteur qui reste positif (tendance à l'augmentation des surfaces, entrée en production de jeunes peuplements) et un facteur climatique tendanciellement défavorable à la productivité.

La manifestation très précoce (dès la période 2015-2028) de cette perte de production découle directement des hypothèses considérées dans GO+. Compte-tenu de la ressource française, l'anomalie moyenne est essentiellement influencée par celle des feuillus, qui est très rapidement décroissante dans la plupart des GRECO du fait de l'application d'un modèle « Hêtre » à l'ensemble des feuillus. Or, c'est une essence particulièrement sensible à la sécheresse, ce qui peut se traduire par une sur-estimation de la mortalité liée à la sécheresse et donc une possible sous-estimation du puits forestier sous l'hypothèse d'une trajectoire climatique de type RCP 8.5. Dans une moindre mesure, on pourrait aussi incriminer un écart (« offset ») entre le climat actuel et le climat prédit par Météo-France. Par ailleurs, la mortalité additionnelle liée aux sécheresses correspond à un facteur appliqué dès la première période et jusqu'en 2050 : les sécheresses simulées sont donc largement aussi sévères que celle de 2003, dès le début.

Les anomalies climatiques, sensibles dès le début de la période simulée sur la production et sur la mortalité, induisent par construction une divergence rapide entre les scénarios « climat actuel » et « RCP 8.5 ». Cette divergence forte illustre les enjeux liés à l'adaptation des peuplements forestiers au changement climatique et doit encourager la réflexion sur des stratégies adaptatives. Une conséquence de cette perte de production est que la ventilation du bilan de carbone se modifie sensiblement par rapport au climat actuel. Par exemple, pour le scénario « Dynamiques territoriales », la répartition stockage/substitution s'établit à 46 % / 41 % (contre 57 % / 33 % sous climat actuel) ; pour le cas du scénario « Extensification », elle vaut 64 % / 33 % (contre 71 % / 20 % sous climat actuel). Le maintien de niveaux de prélèvement significatifs donne à ceux-ci une importance plus forte dans le bilan d'ensemble.

Enfin, rappelons que les bénéfices de stockage en forêt sont toujours réversibles car exposés aux aléas (à plus forte raison si la filière locale est faiblement préparée pour des récoltes de sauvetage), tandis que ceux fournis par la substitution de matériaux ou d'énergies sont cumulatifs et définitivement acquis. Les situations dans lesquelles les leviers forestiers d'atténuation du changement climatique se concentrent sur le stockage en forêt, peuvent être mises à mal par le changement climatique et de grandes crises systémiques, comme celles que nous introduirons dans l'analyse au chapitre suivant.

IV.2. Eléments d'analyse économique : les efforts collectifs nécessaires à l'accroissement des prélèvements visé par le scénario « Intensification ».

Le modèle économique FFSM permet une analyse économique des scénarios de gestion envisagés et propose ainsi des pistes en matière d'instruments de politiques publiques qui serait nécessaire de mettre en place pour orienter la dynamique des filières vers des trajectoires qu'elles ne suivraient pas sans incitation.

Au-delà de la simulation du scénario « Extensification » dont les résultats ont été utilisés plus haut pour déterminer les prélèvements introduits dans MARGOT, nous avons tenté de simuler

avec FFSM le scénario « Intensification ». Pour contraster ces deux scénarios, certains paramètres du modèle ont tout d'abord été modulés pour les adapter à plusieurs des hypothèses centrales contenues dans les scénarios (cf. [Annexe 14 pp. 5-7](#)). Ainsi, en matière de comportements des acteurs, le scénario « Extensification », tel que simulé par FFSM, est caractérisé par des gestionnaires forestiers plus passifs (la part de leurs surfaces forestières soumises à une gestion « active » se réduit considérablement par rapport à la situation actuelle), anticipant moins bien qu'aujourd'hui les risques qu'ils encourent tant en matière climatique qu'en termes de prix (leurs décisions ne s'appuient que sur leurs connaissances actuelles des conditions de production et de marché, ils n'anticipent pas les conditions futures). L'offre de bois ne dépend pas du stock forestier même si celui-ci s'accroît (l'élasticité de l'offre à l'inventaire forestier est égale à 0), de sorte qu'une accumulation en forêt ne se traduit pas par une augmentation de l'offre. A l'inverse, le scénario « Intensification » est caractérisé par des gestionnaires plus actifs qu'aujourd'hui (leur gestion est davantage basée sur un raisonnement de maximisation des profits et la part des surfaces forestières soumises à une gestion « active » augmente). Leur aversion aux risques (climatiques et prix) est plus faible que la valeur moyenne et les gestionnaires forestiers sont plus « éclairés » qu'aujourd'hui quant aux modifications biologiques induites par les changements climatiques. En outre, l'offre de bois dépend, dans ce cas, positivement de l'évolution du stock forestier : lorsque le stock s'accroît, l'offre est plus abondante, alors que lorsqu'il décroît, la récolte est ralentie afin de maintenir un capital sur pied suffisant pour les récoltes futures, suivant une hypothèse classique en économie des ressources naturelles.

La mise en œuvre de ces deux scénarios dans FFSM diffère également sur un point central, celui des incitations nécessaires à leur mise en œuvre. S'il n'y a aucune politique de soutien à la filière, ni aucune mesure structurelle aidée à la transformation, au transport ou à l'investissement dans le scénario « Extensification », les politiques publiques introduites pour tenter de simuler le scénario « Intensification » ont pris deux formes : (1) celle de subventions directes à la consommation et à la production de produits bois et (2) celle de mesures « structurelles » visant à réduire les coûts de la transformation, du transport ou de l'investissement en forêt. Enfin, le plan de reboisement du scénario « Intensification » est intégré en tenant compte de la maximisation du profit et, donc, en favorisant les essences les plus productives. Ainsi, dans la tentative de simulation du scénario « Intensification », ces instruments de politiques publiques constituent des variables d'ajustement. Elles sont calibrées en « contrôlant » trois variables d'état : (i) le volume supplémentaire à produire à l'horizon 2050 ; (ii) l'objectif de ne pas décapitaliser (*i.e.* de ne pas récolter plus que l'accroissement naturel) ; et, (iii) la surface à reboiser : + 50 000 ha/an à partir de 2020.

IV.2.1. Les contraintes de simulation du scénario « Intensification » par FFSM.

En s'appuyant sur cet ensemble d'hypothèses et en visant les objectifs définis pour le scénario « Intensification », FFSM n'a pu obtenir que les niveaux de prélèvements reportés dans le [Tableau 3.2](#). Les niveaux de prélèvements qu'obtient FFSM en tentant de simuler le scénario « Intensification », sont plus proches de ceux que MARGOT retient pour le scénario « Dynamiques territoriales » que de ceux visés par le scénario « Intensification ». Sauf dans les phases de coupes définitives liées à la mise en œuvre du plan de reboisement (périodes 2021-2025 et 2026-2030), les volumes prélevés annuellement sont même un peu inférieur à l'horizon 2050 à ceux obtenus dans le scénario « Dynamiques territoriales ».

Tableau 3.2 : Evolution (2015-2050) des prélèvements annuels obtenus par FFSM pour le scénario « Intensification », comparaison avec les données utilisées pour le scénario « Dynamiques territoriales » (en Mm³ VAT/an, climat actuel, sans crise)

	2016- 2020	2021- 2025	2026- 2030	2031- 2035	2036- 2040	2041- 2045	2046- 2050
Résultats FFSM pour :							
- « Intensification avec plan de rebois »	63,96	77,35	96,16	71,64	72,76	76,17	79,55
- « Intensification sans plan de rebois »	63,96	69,84	70,18	73,96	74,9	77,89	80,20
Données MARGOT pour « Dynamiques territoriales »	64,84	68,00	71,32	74,76	78,13	81,45	84,76

Cet écart très important entre les résultats obtenus après simulation et les objectifs affichés par le scénario donne une forte augmentation des prélèvements s'explique, pour partie, par les contraintes strictes imposées dans le modèle FFSM en matière de niveaux de soutiens publics considérés « acceptables » compte tenu de la nature du modèle. En effet, en absence d'un module spécifiquement dédié aux investissements dans les secteurs de la transformation, peu intéressant pour des simulations à horizon proche mais d'intérêt croissant à mesure que l'horizon s'éloigne, la structure industrielle de la filière représentée dans FFSM n'évolue pas au cours du temps : l'appareil productif et sa capacité de transformation restent les mêmes et il n'y a pas de rendement d'échelle.

Parallèlement, et comme classiquement dans les modèles économiques, les élasticités prix de l'offre et de la demande sont supposées constantes. Dans la réalité, ces paramètres peuvent évoluer de façon importante, soit « spontanément », comme cela semble être le cas actuellement (la préférence pour les produits bois devenant progressivement plus prégnante), soit au gré des incitations mises en place, monétaires ou non. Prenons l'exemple de la consommation de bois-énergie : si une politique de subvention à l'achat de chaudière bois est mise en place, la fonction de demande tend à se rigidifier (demande moins élastique), les consommateurs se retrouvent dans une situation de « lock-in » puisque, quel que soit le prix du bois-énergie, ils en consomment du fait de l'importance de l'investissement que représente l'achat d'une chaudière. En l'absence de ces formes de souplesse de la structure industrielle et des comportements dans le modèle, le « domaine de validité » de FFSM est limité par des types de soutiens publics qui ne modifient ni les comportements, ni les caractéristiques structurelles de la filière. C'est cela qui empêche la simulation FFSM d'atteindre l'objectif du niveau de prélèvements définis *a priori* pour ce scénario et le limite au niveau de celui utilisé pour le scénario « Dynamiques territoriales ».

Ce résultat, techniquement contraint, a cependant une signification empirique forte. En effet, il met en lumière les limitations économiques actuelles de la filière forêt-bois française qui, sans une évolution importante de ses structures industrielles et de ses capacités de production et de transformation et sans une stimulation des préférences des consommateurs pour les produits bois, serait bien en mal d'absorber spontanément la forte augmentation des prélèvements envisagés dans le scénario « Intensification ».

IV.2.2. Les efforts collectifs à consentir pour stimuler les niveaux de production de la filière forêt-bois française

Il apparaît donc difficile économiquement d'atteindre, sans modification de la structure industrielle et des comportements des acteurs, les objectifs de niveau de prélèvements fixés dans le scénario « Intensification ». En absence de ces évolutions structurelles et pour tendre

vers cet objectif, le modèle FFMS intègre un soutien de la filière *via* un système d'incitations de diverses natures. Mais, même en poussant jusqu'à 6 milliards d'euros à l'horizon 2050, le total des incitations et soutiens octroyés à la filière (cf. [Tableau 3.3](#)), le volume de la récolte attendu ne peut, sans modification structurelle, aller au-delà de celui du scénario « Dynamiques territoriales » et qui correspond à un maintien du taux de prélèvement actuel.

Tableau 3.3 : Soutiens publics et incitations introduites dans FFMS pour tenter d'aller vers le scénario « Intensification avec plan de reboisement » (climat actuel, sans risque, en millions d'€)

	2015	2020	2030	2040	2050
Soutien à l'investissement en forêt	0	23	24	27	30
Soutien à l'offre	0	625	926	1 279	1 818
Soutien au transport	0	5	10	10	17
Soutien à la transformation	0	434	941	990	1 634
Soutien à la demande	0	1 073	1 523	2 036	2 522
Total	0	2 159	3 424	4 343	6 021

Pour orienter la filière vers une telle augmentation de ses volumes de production, FFMS s'appuie sur plusieurs types de soutiens et incitations, visant les différents stades de la filière (investissement en forêt, soutien à l'offre, au transport, à la transformation et à la demande) (cf. [Annexe 14, pp. 12-15](#)). Dans cet ensemble, ce sont tout d'abord les subventions directes à la consommation (c'est-à-dire, les subventions qui, en absence d'une modification des préférences des consommateurs, diminuent les prix d'achat) qui, avec plus de 40 % du total, seraient les incitations les plus coûteuses. Comme classiquement, de telles subventions constituent cependant un « effet d'aubaine » qui explique une partie importante de leur coût. Celui-ci représente les coûts liés aux comportements de consommation subventionnés qui auraient lieu même si une subvention n'était pas mise en place. Dans le cas d'une subvention à la consommation, c'est toute la consommation qui est subventionnée, et non uniquement la consommation « additionnelle ». Les aides à la transformation et les incitations visant à stimuler l'offre (c'est-à-dire, celles qui confortent les prix de vente) représentent l'autre part importante des soutiens et incitations nécessaires pour que la filière puisse absorber un tel surcroît de production. Elles représentent respectivement 30 % et 26 % du total. Les premières concernent directement les structures industrielles de la filière et peuvent accompagner l'évolution de leurs coûts de production (sans pour autant, compte tenu de la nature du modèle et des hypothèses, remettre à plat l'organisation et le mode de fonctionnement du tissu industriel comme mentionné au-dessus). Les secondes s'adressent aux propriétaires forestiers pour les inciter à offrir à la vente leurs bois sur pied disponibles en forêt.

Compte tenu notamment de l'effet d'aubaine induit par les subventions que FFMS octroie à la consommation et des rigidités du modèle en matière de comportements des consommateurs et d'investissements de la filière, la question qui se pose est de savoir si la réalisation de cet équilibre de marché nécessiterait réellement un tel niveau de soutiens et d'aides ou si au moins une partie de celui-ci ne pourrait pas être atteinte en s'appuyant simplement sur des comportements de consommation évoluant eux-mêmes vers les produits bois, soit par prise de conscience de la nécessité de l'atténuation du changement climatique, soit en réponse à des aides à l'investissement les orientant vers les produits bois. Par ailleurs, une stimulation forte et une restructuration de l'appareil productif apparaissent nécessaires pour augmenter les capacités de transformation de la filière et pour mieux orienter les productions vers les produits à valeur ajoutée élevée et/ou à fort potentiel d'atténuation. Celles-ci passent par un jeu d'incitations publiques ou privées plus strictement orientées vers les investissements dans la filière que vers un soutien direct aux mises en marché.

De l'activation de ces leviers (que les outils mis en œuvre ici ne permettent pas d'intégrer totalement) dépend la possibilité concrète d'augmenter les niveaux de prélèvements de la forêt française et de se rapprocher des niveaux attendus pour les scénarios « Intensification » et même « Dynamiques territoriales ».

IV.2.3. Produits bois récoltés et consommés

Le [Tableau 3.4](#) présente les évolutions des quantités de produits bois offertes, consommées, exportées et importées par la filière forêt-bois française à l'horizon 2050 sous les deux scénarios « Extensification » et « Intensification avec plan de reboisement » tels que simulés par FFSM et en distinguant les produits primaires et les produits transformés (cf. [Annexe 14](#), pp. 11-12)

Tableau 3.4 : Evolution 2015-2050 des termes de l'équilibre emplois-ressources par produit primaire et produit transformé pour les scénarios « Extensification » et « Intensification » tels que simulés par FFSM (Climat actuel, sans crise)

	Volume 2015 (Mm ³)		Scénario « Extensification » Δ 2015-50 (%)				Scénario FFSM d'« Intensification » Δ 2015-50 (%)			
	Prod. ¹	Conso ²	Prod ¹	Import ³	Conso ²	Export ³	Prod ¹	Import ³	Conso ²	Export ³
Bois d'œuvre feuillu	6,3	5,1	+7,9%		+2,0%	+33,3%	+50,8%		+35,3%	+108%
Bois d'œuvre résineux	21,5	20,2	+0,0%		-0,5%	+16,7%	+26,5%		+25,2%	+66,7%
BI-BE	46,6	44,4	+4,1%		+2,0%	+45,5%	+53,2%		+48,2%	+154%
Sciages feuillus	2,3	2,4	0,0%	0,0%	+4,2%		+34,8%	0,0%	+37,5%	
Sciages résineux	10,7	13,3	-0,9%	-4,0%	-1,5%		+25,2%	+4,0%	+20,3%	
Panneaux	5,5	7,5	0,0%	-5,0%	-1,3%		+38,2%	+10,0%	+29,3%	
Placages	0,5	0,8	0,0%	0,0%	0,0%		+20,0%	0,0%	+25,0%	
Pâte à papier	7,2	10,9	+4,2%	-2,8%	+0,9%		+48,6%	0,0%	+31,2%	
Bois énergie	25,5	25,6	+2,0%	0,0%	+1,6%		+51,4%	0,0%	+51,2%	

¹ Pour les produits primaires, la quantité offerte correspond à la quantité entrant dans la filière en amont, quelle que soit son origine (forestière ou non) et quelle que soit sa destination (industries de transformation domestique ou export). Pour les produits transformés, la quantité offerte est la quantité sortant des industries de transformation domestiques (et donc hors les éventuelles importations).

² Pour les produits primaires, la quantité consommée est la quantité entrant dans les industries de transformation domestiques, alors que, pour les produits transformés, il s'agit de la demande des industries de seconde transformation, importations incluses.

³ Le modèle FFSM ne permet de représenter ni les exportations de produits transformés, ni les importations de produits primaires.

Notons tout d'abord que la somme des volumes des trois produits primaires offerts (74,4 Mm³ en 2015) est supérieure au volume récolté en forêt présenté précédemment. Cet écart se explique par le fait que le volume offert ici est en réalité la somme de 4 volumes : le volume récolté en forêt, le volume récolté dans des structures non forestières (par exemple, bocages), la biomasse dont l'origine n'est pas directement forestière (par exemple, le recyclage des connexes de scieries pour produire du BI-BE) et, enfin, le bois issu d'arbres morts.

Comme on pouvait s'y attendre, le scénario « Extensification » ne modifie que marginalement les équilibres emplois-ressources⁹ des différents produits de la filière. Restant à niveau de production inchangé, il y a peu de raison pour que les équilibres économiques de la filière en soient profondément modifiés. Seules quelques évolutions sont perceptibles en matière d'exportations mais elles ne portent finalement que sur de faibles volumes.

Dans le cas du scénario « Intensification » de FFSM, l'effet combiné des incitations à la demande et à l'offre induit une augmentation conséquente de la production et de la consommation de tous les produits de la filière et un doublement du niveau des exportations,

⁹ qui sous-entendent que, pour chaque produit, la somme des emplois (Consommation + Exportations) égale la somme des ressources (Production + Importations).

les niveaux d'importations restant, quant à eux, relativement stables. Que ce soit en termes absolus ou relatifs, ce sont les secteurs du bois énergie et de la pâte à papier qui enregistrent les gains les plus importants, en partie du fait des incitations plus élevées simulées pour ces secteurs. Le jeu des incitations et surtout les inerties du système telles que portées par le modèle ne modifient que très peu la structure des usages : sous ces hypothèses très restrictives, les débouchés resteraient donc massivement concentrés sur, d'une part, le bois énergie et, d'autre part, le bois d'œuvre issu de résineux, suivis de assez loin par la pâte à papier et les panneaux¹⁰.

Il est important de noter que la forte augmentation de la consommation des produits bois reste ici compatible avec de faibles niveaux d'importations et une récolte durable sur l'ensemble du territoire français.

IV.2.4. Impacts de l'intensification de la gestion sur les résultats économiques globaux de la filière

Si les bénéfices que producteurs et consommateurs peuvent tirer de la situation décrite par le scénario « Extensification » ne évoluent que peu à l'horizon 2050 par rapport à la situation actuelle (cf. [Tableau 3.5](#)), il n'en est pas de même pour le scénario « Intensification » simulé par FFSM. Dans ce dernier cas, le surplus¹¹ total de la filière pourrait être en 2050 de 75 % plus élevé que celui de 2015 (cf. [Annexe 14 pp 12-15](#)).

Tableau 3.5 : Evolution 2015-2050 des résultats économiques de la filière forêt-bois française pour les scénarios « Extensification » et « Intensification » de FFSM (Climat actuel, sans crise, en millions d'€)

	2015	2020	2030	2040	2050
Scénario « Extensification »					
Surplus consommateurs	5 279	5 324	5 377	5 311	5 245
Surplus producteurs	1 912	1 921	1 918	1 964	2 024
Scénario « Intensification » de FFSM					
Surplus consommateurs	5 281	6 923	8 023	8 926	10 232
Surplus producteurs	1 910	2 030	2 091	2 165	2 372

Cette forte augmentation bénéficierait plus nettement aux consommateurs dont le surplus croîtrait de 95 % en 35 ans, qu'aux producteurs pour qui la croissance de leurs bénéfices n'excéderait par les 15 %. La mise en place des mesures de politiques publiques envisagées qui induiraient un simple maintien du taux de prélèvement, serait ainsi plus favorable aux consommateurs qu'aux producteurs. Ce résultat est important du point de vue de l'acceptation politique de telles mesures.

En sommant l'ensemble des coûts induits par les politiques publiques (cf. [Tableau 3.4](#)) et les surplus des agents économiques de la filière bois représentés dans le modèle FFSM (cf. [Tableau 3.5](#)), on pourrait être tenté de conclure que, comparativement au scénario « Extensification », la trajectoire plus dynamique du scénario « Intensification » de FFSM engendre, sur l'ensemble de la période considérée, un surplus social net en légère diminution (d'environ 10 %), en dépit des gains considérables que cette trajectoire permettrait à la filière. Il est néanmoins nécessaire d'être prudent dans l'interprétation d'un tel résultat. Au-delà de la nature très spécifique (et coûteuse) des soutiens publics qu'intègre FFSM et de l'effet

¹⁰ Même en tenant compte des coefficients de transformation de ces produits qui sont de 1,53 pour la pâte à papier et de 1,43 pour les panneaux.

¹¹ Le surplus du consommateur est la différence entre ce qu'un consommateur est prêt à payer pour un bien et le montant effectivement payé (on parle aussi de « bien-être » du consommateur). Le surplus du producteur est la différence entre le prix auquel le producteur était prêt à vendre le bien et le prix obtenu (le prix d'équilibre).

de la forêt dont pourraient bénéficier les consommateurs, FFSM est un modèle en équilibre partiel : il ne prend donc pas en considération les rétroactions macroéconomiques pouvant avoir lieu avec d'autres secteurs. Notamment, l'augmentation de la consommation de certains produits bois, comme le bois-énergie, se traduira pour partie par une diminution de la consommation d'énergies fossiles par effet de substitution. Cette substitution est *a priori* plus importante dans les scénarios dynamiques, comparativement à un scénario de « Extensification », du fait de l'augmentation des niveaux de consommation. Or, dans un contexte d'incertitudes sur les prix des énergies fossiles, la substitution de ces dernières par du bois énergie peut se traduire par un gain de surplus net supplémentaire que FFSM seul ne peut pas représenter. Afin de tester cette hypothèse, il faudrait coupler le modèle FFSM avec un modèle économique en équilibre général représentant explicitement l'ensemble des secteurs et notamment les secteurs énergétiques.

V. Conclusion

Nos trois scénarios participent tous de façon forte à l'atténuation du changement climatique. Ils se distinguent par les leviers qu'ils activent en matière d'atténuation du changement climatique. Dans le scénario « Extensification », le levier prioritaire consiste en un stockage annuel croissant dans l'écosystème forestier, notamment dans la biomasse forestière, au détriment d'une stimulation du stockage en produits et des effets de substitution. Certains indices peuvent faire penser que cette stratégie pourrait atteindre certaines limites du fait du fléchissement de la capacité de stockage de la forêt à mesure de la densification des peuplements et/ou en cas d'aggravation des effets du changement climatique. À l'inverse, les scénarios « Dynamiques territoriales » et, notamment, « Intensification avec plan de reboisement » s'appuient en compensation d'un stockage moindre en forêt sur les effets de substitution, où la substitution matériau prend une place prépondérante. C'est cependant sur ce dernier volet que les incertitudes sont les plus flagrantes, les coefficients de substitution et, surtout, leurs évolutions dans le temps étant particulièrement délicats à saisir ou à anticiper. Il ne demeure pas moins que ce mécanisme de complémentarité d'une stratégie de stockage en forêt par une stratégie de substitution pourrait être plus robuste en cas d'aggravation des effets du changement climatique. Néanmoins, le rôle joué par le plan de reboisement précis, proposé ici, n'apparaît pas flagrant à l'horizon 2050 : d'une part, ses effets sur le stockage en forêt ne semblent pouvoir se faire ressentir qu'au-delà de l'horizon considéré ; d'autre part, certaines des contraintes, logiques, introduites dans la programmation de ce plan de reboisement limitent les gains de productivité forestière attendus de ce plan.

D'un point de vue économique, si la stratégie d'intensification de la gestion forestière présente des avantages tant en termes de gains économiques qu'en matière d'emplois, les freins mis en évidence par l'analyse sont importants. En effet, en absence de modification des comportements de consommation ou de la structure industrielle française, ce serait un montant important en subventions directes qui seraient nécessaires pour simplement maintenir les taux de prélèvement d'aujourd'hui, qui correspondent cependant à une hausse importante des volumes produits et consommés. L'évolution en cours de la consommation semble aller dans ce sens. En revanche, les investissements et les structures commerciales et d'accompagnement seraient à stimuler fortement pour, d'une part, accroître les volumes traités, transformés et mis en marché et, d'autre part, faire évoluer la répartition des usages vers le bois d'œuvre, potentiellement le plus avantageux en matière de stockage de carbone et d'effets de substitution.

CHAPITRE IV. Impacts de crises majeures sur le bilan carbone de la filière forêt-bois à l'horizon 2050

Au-delà des effets d'une accentuation des impacts du changement climatique, des crises majeures, d'origine biotique ou abiotique, pourraient, d'ici 2050, toucher les forêts françaises et affecter une ou plusieurs composantes du bilan carbone (Galik & Jackson, 2009 ; Bradford *et al.*, 2013). C'est pourquoi il est apparu intéressant et novateur de compléter la démarche en introduisant, dans ce type d'étude, diverses formes de crises. Trois types de crises majeures ont ainsi été imaginés et simulés : un épisode incendiaire de grande ampleur, aggravant les impacts de la sécheresse introduite en accentuation des effets du changement climatique ; une tempête de grande envergure dévastant comme Lothar-Martin et Klaus les massifs forestiers français, sachant que ce type d'événements extrêmes s'accompagne de pullulation de scolytes sur les résineux et d'épisodes incendiaires conséquents ; différents types d'invasions biologiques touchant les pins ou les chênes. L'impact sur le bilan carbone de ces crises est également évalué pour chacun des compartiments de la filière forêt-bois. Ces crises, qui peuvent se dérouler à tout moment et prendre de multiples formes, ont besoin d'être définies strictement avant de pouvoir simuler leurs conséquences sur les dynamiques forestières et d'établir leurs effets sur le bilan carbone à l'horizon 2050.

I. Des crises forestières majeures liées à des combinaisons d'aléas biotiques et abiotiques

Les phénomènes extrêmes ont un effet structurant car, lorsqu'ils sont de grande ampleur, ils modifient les dynamiques écologiques et/ou socio-économiques sur le long terme, comme ce fut le cas à plusieurs occasions au cours des dernières décennies.

Depuis 50 ans, les tempêtes et les incendies sont, en Europe, les perturbations les plus déstabilisantes aux différents niveaux de gestion. La survenue d'une crise analogue à la situation que connaît depuis 20 ans le continent nord-américain (méga-sécheresses, scolytes des pins, incendies) constituerait un changement de régime qui doit être pris en compte, à une échelle régionale ou nationale. De même, les risques d'invasions biologiques majeures pourraient freiner brutalement le développement d'essences bien implantées. Lorsqu'il s'agit d'anticiper de telles combinaisons de risques et des crises associées, le savoir-faire est encore peu étoffé au niveau international, les chercheurs déchiffrant ces situations à mesure qu'elles se présentent. Compte tenu de l'importance de l'impact potentiel de tels phénomènes sur la capacité de stockage de carbone par la filière forêt-bois, il est apparu intéressant, bien que risqué, de s'engager dans une démarche de prospective multirisques, rassemblant des spécialistes des différents aléas et dommages.

I.1. Pourquoi intégrer des crises dans les simulations ?

Les forêts françaises sont soumises régulièrement à des aléas biotiques (insectes et pathogènes) et abiotiques (sécheresse, gel, tempête, feu). La connaissance des aléas permet d'estimer le risque. En effet, la notion de risque peut être définie comme l'interaction entre trois composantes :

- la fréquence et l'intensité de l'aléa,
- la vulnérabilité du système qui définit l'ampleur du dommage causé par l'aléa,

- l'impact écologique et socio-économique sur les enjeux exposés au risque, c'est-à-dire la perte liée au dommage en fonction de la valeur du système (adapté de IPCC, 2014, WGII).

La fréquence et l'intensité des aléas pourraient en outre augmenter sous l'effet des dérèglements climatiques (Lindner *et al.*, 2010) ou de la poursuite d'intenses échanges internationaux (Fisher *et al.*, 2012), et la vulnérabilité des forêts pourrait parallèlement augmenter sans que l'aléa soit lui-même directement modifié (cas des tempêtes).

Les aléas qui menacent les forêts compromettent directement leur capacité à fournir des biens et des services, mais aussi augmentent leur vulnérabilité à d'autres risques naturels comme les inondations, les pollutions, les avalanches, les glissements de terrain ou les chutes de blocs mettant en péril d'autres enjeux humains (Landmann et Berger, 2015).

Alors qu'on observe déjà une aggravation du régime des incendies, liée à une augmentation du risque météorologique feux de forêt dans certains pays du sud de l'Europe et, notamment, dans la péninsule ibérique (Piñol *et al.*, 1998 ; Pausas, 2004), la situation sur le front des incendies en France semble pour l'instant maîtrisée. L'analyse des statistiques incendies de forêt en France méditerranéenne sur la période historique de la base Prométhée montre que les surfaces brûlées annuellement marquent une tendance à la baisse, et les moyennes annuelles par décennie passent de plus de 30 000 ha de 1974 à 1983, à un peu plus de 7 000 ha sur la dernière décennie. Ces bons résultats sont obtenus alors que le risque incendie a augmenté sur les dernières décennies (Chatry *et al.*, 2010). Cette réussite peut être imputée en partie aux effets combinés des dispositifs de prévention et de lutte en France et, notamment, à l'efficacité de la stratégie du traitement des feux naissants. Néanmoins, ces moyennes cachent des variations interannuelles très fortes, avec des plafonds record comme l'année 2003, ce qui montre que ce bilan favorable est le fruit d'un équilibre fragile où le niveau de parades peut être dépassé par une situation météorologique exceptionnelle.

Que prévoient les modèles projetant le risque incendie de forêt jusqu'à la fin du siècle ? Bedia *et al.* (2014) calculent différents indicateurs dont l'Indice Forêt Météo (IFM) pour différents pays de la rive nord de la Méditerranée pour la période historique (1971-2000), puis, en mettant en œuvre une série de modèles climatiques pour 3 périodes futures (2011-2040 ; 2041-2070 ; 2071-2100). L'étude montre d'abord que l'IFM pour la France est sous le niveau des autres pays de l'Europe du sud, qu'il resterait, mais doublerait néanmoins à l'horizon 2100. Chatry *et al.* (2010) estiment que les zones à risque d'incendie de végétation qui représentent actuellement le tiers des surfaces de landes et de forêts du territoire métropolitain français devraient augmenter de 30 % à l'horizon 2040, pour atteindre la moitié des surfaces forestières à l'échéance 2050. Pour ce qui concerne la longueur de la saison de feux, la France part d'un niveau beaucoup plus bas que les autres pays du sud de l'Europe (2 à 3 mois estivaux), mais rattraperait en 80 ans la durée de la saison d'incendies de ces pays en doublant la période à risque, avec plus de feux de fin d'hiver, de printemps et de fin de saison à l'automne (Bedia *et al.*, 2014).

Concernant les risques biotiques qui pèsent sur la forêt, les ravageurs forestiers et les pathogènes invasifs ont été favorisés par la recrudescence des échanges commerciaux (Roques *et al.*, 2010 ; Desprez-Loustau *et al.*, 2010 ; Santini *et al.*, 2013). Le cynips du châtaignier, la chalarose du frêne, le phytophthora de l'aulne, la pyrale du buis, le *Phytophthora ramorum* sur le mélèze, capricorne asiatique, sont autant d'exemples d'installation et de propagation récentes dans les forêts métropolitaines. Leur installation et leur diffusion ont été favorisées par des conditions environnementales nouvellement favorables (Robinet *et al.*,

2012). Le risque d'invasion biologique est de plus influencé par le changement du climat (Bellard *et al.*, 2013).

Outre les espèces invasives, des études récentes montrent comment le dérèglement climatique pourrait favoriser les dommages d'insectes et de pathogènes autochtones. L'augmentation de la fréquence ou de l'intensité des sécheresses pourrait se traduire par des vagues de dépérissements et augmenter la sensibilité des arbres à de nombreux parasites comme les scolytes ou le Sphaeropsis (Desprez-Loustau *et al.*, 2006 ; Fabre *et al.*, 2011, Jactel *et al.*, 2012). Robinet *et al.* (2015) soulignent que le réchauffement climatique pourrait induire une augmentation du nombre de générations d'insectes ravageurs et de leurs performances reproductrices, notamment des scolytes (Pineau *et al.*, 2017). Des conditions de températures plus élevées pourraient également favoriser l'extension des aires de distribution des insectes et des pathogènes comme on peut le voir pour la processionnaire du pin (Battisti *et al.*, 2005) ou le chancre du chêne (Bergot *et al.*, 2004).

On peut donc conclure que certains aléas en forêt sont actuellement maîtrisés sauf en conditions climatiques extrêmes (incendies), d'autres ont déjà augmenté sur les décennies passées (sécheresses, invasions d'insectes et de pathogènes) ou ont fait des dégâts massifs (tempêtes) et que tous sont attendus en augmentation à moyen ou long terme sous l'effet du changement global ou de l'évolution de la structure forestière.

Par ailleurs, on a déjà observé des interactions entre aléas, pouvant amener à des effets d'amplification, ce qui invite à considérer des cascades de risques comme faisant système (Breda *et al.*, 2006 ; Desprez-Loustau *et al.*, 2006 ; Marçais et Bréda 2006 ; Jactel *et al.*, 2012).

Ces aléas provoquent une mortalité additionnelle potentiellement importante comparée à la mortalité de fond régulièrement enregistrée (< 1 %), ce qui peut aller jusqu'à impacter la capacité des forêts à stocker du carbone (Kurz *et al.*, 2008) et peut remettre en cause les options de gestion et d'adaptation mises en œuvre. Tout ceci justifie d'intégrer des crises perturbant la dynamique forestière dans les simulations.

1.2. Quels aléas ont-été choisis et pourquoi ?

On a choisi de prendre en compte ici une combinaison d'histoires de risques dont les effets pourraient être amplifiés avec le changement climatique, de façon à intégrer les interactions entre risques. C'est pourquoi certains de ces risques ne sont pas traités indépendamment les uns des autres mais au contraire mis ensemble dans des scénarios.

Les aléas retenus ont de forts impacts sur la production de bois : réduction de croissance forte, mortalité massive avec ou sans régénération possible, sur un territoire d'une surface d'ampleur régionale ou nationale. Au-delà de la sécheresse qui a déjà été intégrée dans les options climatiques, on a choisi les aléas suivants : tempête, incendie, scolytes, invasion d'insectes ou de pathogènes (cf. [Annexe 12 p. 11](#)). Certains d'entre eux ont été combinés: les incendies interviennent en lien avec la sécheresse, les tempêtes sont suivies de pullulations de scolytes et d'incendies. Pour ces deux combinaisons, l'intensité de l'aléa est modifiée par le scénario climatique. En revanche, les invasions biologiques ont été traitées seules et ont été considérées indépendamment de l'option climatique.

1.2.1. Incendies après sécheresse

*** Description de la crise**

Il s'agit d'une saison catastrophique d'incendies comprenant de nombreux feux de forêt dans toute la gamme habituelle des dimensions des incendies en France, dont un certain nombre de méga-feux, ajoutant au caractère exceptionnel de cette saison.

L'année 2003 représente l'année de référence pour ce scénario de crise permettant de caractériser une saison feux de forêt catastrophique. C'est l'année record en termes de surface totale brûlée (73 278 ha . source EFFIS) s'expliquant par l'ampleur de la vague de chaleur et de la sécheresse de l'été 2003. Le bilan annuel d'incendies est obtenu avec plusieurs centaines de feux de dimensions très variables, s'élevant en 2003 de 1 à 6 744 ha. On retrouve, lors de cette saison d'incendies exceptionnelle, la même règle que celle qui gouverne tous les bilans, même les plus faibles : quelques grands incendies concourent à l'essentiel du bilan. Ces incendies représentent ce que l'on qualifiera de méga-feux pour la France, ils se développent dans des situations de perte de contrôle total par le système de prévention et de lutte, avec quasiment aucune protection effective des espaces forestiers.

Ceci a conduit à considérer le niveau de danger d'incendie de 2003 comme le seuil de référence pour le scénario « sécheresse puis incendies ». La crise se déroule, à l'échelle nationale, sur les mois de juillet et août durant lesquels, historiquement, l'essentiel des surfaces incendiées est déploré. Cette crise est appliquée dans les deux cas de scénarios climatiques : climat actuel et RCP8.5.

*** Dimension de la crise**

L'équipe GO+ a calculé, pour les mois de juillet et août 2003, le FWI (*Fire Weather Index*)¹² moyen mensuel France entière sur la maille SAFRAN¹³ 8 km x 8 km avec les données météo observées de l'année de référence 2003 (cf. [Annexe 9 pp 2-3](#)). Une valeur moyenne de 12,69 pour le FWI a été retenue pour représenter le danger d'incendie de référence pour la France.

Le FWI mensuel a aussi été estimé pour toutes les années de 2017 à 2050 avec les données météo simulées au moyen du modèle dynamique régional du CNRM ALADIN (ALADIN-Climat v4) sur la base du scénario climatique RCP8.5. La valeur moyenne la plus élevée (30,42) des mois de juillet et août représente un danger d'incendie 2,4 fois plus élevé que pour l'été 2003. En appliquant ce facteur d'aggravation à la surface totale nationale incendiée en 2003 (73 278 ha . source EFFIS), on obtient une estimation de la surface totale brûlée lors de la crise « sécheresse puis incendies » s'élevant à 175 000 ha.

*** Aspects temporels et spatiaux**

L'occurrence de la sécheresse extrême qui déclenche la crise « sécheresse puis incendies » a été fixée arbitrairement pendant le cycle quinquennal du modèle MARGOT 2026-2030 afin qu'elle se produise suffisamment tôt dans la période étudiée (2017-2050) pour disposer d'une période post-crise suffisamment longue pour en évaluer les effets.

Pour les besoins de l'étude, et par souci de simplification des analyses, une seule crise

¹² Le FWI est un indice de danger d'incendies composite intégrant plusieurs indicateurs élémentaires. Il combine in fine une vitesse de propagation initiale du feu et les quantités de combustible disponibles (Van Wagner C.E., 1987).

¹³ Les données SAFRAN sont des données couvrant la France à une résolution de 8 km sur une projection Lambert-II étendue. Elles sont produites par Météo-France (Centre National de Recherches Météorologiques, CNRM).

« sécheresse puis incendies » a été positionnée pendant la période de simulation choisie, même si un scénario plus probable verrait la répétition de crises de ce type à chaque sécheresse significative.

La localisation des zones de la France métropolitaine touchées par les incendies a été faite en isolant les mailles SAFRAN de plus forts dangers d'incendies ($FWI > 29,5$), puis les zones forestières réellement impactées au moyen de l'inventaire forestier national. Pour définir la surface incendiée totale, le choix a été porté prioritairement sur les points d'inventaire ayant les plus fortes sensibilités aux incendies jusqu'à atteindre les surfaces de 75 000 ha et 175 000 ha, respectivement dans le scénario de climat « actuel » et RCP 8.5¹⁴.

L'indice empirique d'aggravation de la sensibilité à l'incendie des formations forestières a été construit par l'INRA-URFM et l'IGN à partir d'une sélection de variables mesurées sur les points de l'inventaire forestier (cf. [Annexe 9 pp. 3-4](#))

* **Impacts sur la forêt et la filière**

La [Figure 4.1](#) présente la distribution des incendies du scénario de crise « sécheresse puis incendies » sous scénario climatique RCP8.5.



Figure 4.1 : Localisation des points d'inventaire incendiés pour le scénario de crise « sécheresse puis incendies » et le scénario de climat RCP8.5

Sur chaque zone brûlée, la mortalité des arbres est totale. Le volume de bois mort issu des incendies a été évalué par le modèle de ressource MARGOT. Ce modèle fournit les volumes de bois morts déclinés par essences dominantes (cf. [Annexe 12 pp.25-26](#)).

Les débouchés des bois brûlés sont limités du fait de la carbonisation des troncs. Ils peuvent néanmoins être valorisés en panneaux de particules ou en bois énergie (cf. [Annexe 12, Tableau 12.2 p.14](#)).

¹⁴ Le même sous-ensemble de mailles SAFRAN a été utilisé dans le cadre du scénario de crise "tempêtes et cascade de risques" où nous avons fait le choix d'affecter exclusivement les forêts incendiées dans la trace de la tempête (cf. [Annexe 9](#)).

1.2.2. Tempêtes, attaques de scolytes et incendies

*** Description de la crise**

Il s'agit ici de documenter une crise de tempêtes hivernales d'une ampleur nationale entraînant une pullulation de scolytes sur pins et épicéas suivie d'une saison catastrophique d'incendies pendant l'été de la même année. Le caractère exceptionnel de cette crise est lié à la surface forestière impactée par les tempêtes et aux pertes en bois additionnelles dues aux pullulations de scolytes et aux incendies. Les tempêtes Lothar et Martin de 1999 ont été choisies comme référence, ces deux tempêtes qui se sont suivies à 2 jours d'intervalle, ont, à l'échelle de l'Europe, détruit plus de 240 millions de m³ de bois dans 15 pays dont 176 millions de m³ en France, soit environ 3 années de récolte. Ce scénario est traité dans les deux options climatiques étudiées : climat actuel et RCP 8.5.

L'ampleur des tempêtes n'a pas été modifiée dans le scénario RCP 8.5. En effet, les modifications de fréquence et d'intensité de vents extrêmes dues au changement climatique sont moins avérées que les projections d'évolution des températures. En revanche, les études s'accordent à dire que la vulnérabilité des forêts aux tempêtes serait affectée par plusieurs phénomènes liés au changement climatique : températures et précipitations plus élevées pendant l'hiver, diminuant la qualité de l'ancrage des arbres. De même, le scénario RCP 8.5 risque d'aggraver les dégâts dus aux scolytes (effet de la sécheresse et de la température) et d'augmenter la surface touchée par les incendies.

*** Aspects temporels et spatiaux**

La période de la crise « Tempêtes, scolytes et incendies » a été fixée arbitrairement (pendant le cycle quinquennal du modèle MARGOT 2026-2030) et suffisamment tôt pendant la période de simulation choisie pour cette étude (2017-2050) de façon à pouvoir observer les effets de cette cascade de catastrophes selon les différents scénarios de gestion. La saison des incendies a été placée pendant la saison estivale suivant les tempêtes hivernales, comme proposé pour le scénario de crise « Sécheresse et Incendies ».

Pour les besoins de l'étude et par souci de simplification des analyses, une seule crise « Tempêtes, scolytes et incendies » a été positionnée pendant la période de simulation choisie. Pour définir la zone des tempêtes, nous avons sélectionné les strates IGN présentant en essences principales des pins et des épicéas de façon à simuler les plus forts impacts de pullulations de scolytes.

Une trajectoire Sud-Ouest vers Nord-Est, au départ des Charentes a été proposée sur la base de cette sélection de strates IGN. La surface touchée par les tempêtes a été choisie grâce au catalogue des tempêtes qui enregistre les données principales des tempêtes majeures en Europe des 50 dernières années. Une surface totale entre 700 000 ha et 1 000 000 ha, c'est-à-dire une bande de 50 km de large sur 200 km de long a été proposée permettant de reproduire la surface la plus large impactée par une tempête en Europe lors des 50 dernières années (cf. [Annexe 10 pp. 2-4](#)).

*** Impacts sur la forêt**

Cette première trajectoire représente le cœur de la tempête (zone orange sur la [Figure 4.2](#)) où le taux de dégâts (Chablis + Volis) est supérieur à 40 %, les zones touchées font l'objet de coupes de récolte totale. A cette zone centrale, est ajoutée une zone périphérique où les peuplements sont touchés à moins de 40 %, cette zone de dégâts secondaires (zone bleue sur la [Figure 4.2](#)) présente une surface d'environ 685 000 ha. L'estimation des volumes détruits par la tempête a été calculée grâce au modèle ForestGales avec des volumes par classe de

diamètre fournis par le modèle MARGOT par catégorie d'essences à la date de déclenchement de la crise. On obtient le volume de bois détruit, soit par chablis, soit par volis, et de diamètre pour chacune des deux zones de dégâts liés aux tempêtes. Après calcul et compte tenu de la répartition des espèces, le pourcentage de arbres chablis est de 43 % dans la zone orange ; il est de 16 % dans la zone bleue. Ces pourcentages de volumes de dégâts ne sont pas affectés par le scénario RCP 8.5 (cf. Annexe 12 pp.26-28).

Les surfaces forestières éventuellement brûlées dans les zones hors tempêtes ont été volontairement négligées dans ce scénario de crise. Ici, seule la sécheresse locale, évaluée au moyen de l'indice de danger d'incendie (FWI . cf. Annexe 9 pp 2-3), a été utilisée pour localiser les mailles SAFRAN de plus fort FWI jusqu'à atteindre les surfaces de zones forestières brûlées de 75 000 ha et 175 000 ha, respectivement en scénario de climat « actuel » et RCP 8.5. Les incendies post-tempêtes sont très dynamiques, ils produisent plus de charbon de bois que les feux de végétation classiques. Or, des études récentes soulignent la durée de vie très longue du carbone séquestré dans les charbons de bois et proposent de mieux le prendre en compte dans les bilans carbone des écosystèmes forestiers soumis à des régimes d'incendies plus sévères du fait du changement climatique. Par ailleurs, on peut s'attendre à une destruction par le feu des places de dépôt de bois, zone d'attente d'enlèvement en bord de parcelles ou des plateformes de stockage contribuant à aggraver la perte de carbone. Sur les zones incendiées, la mortalité des arbres qui avaient survécu aux tempêtes a été considérée comme totale.

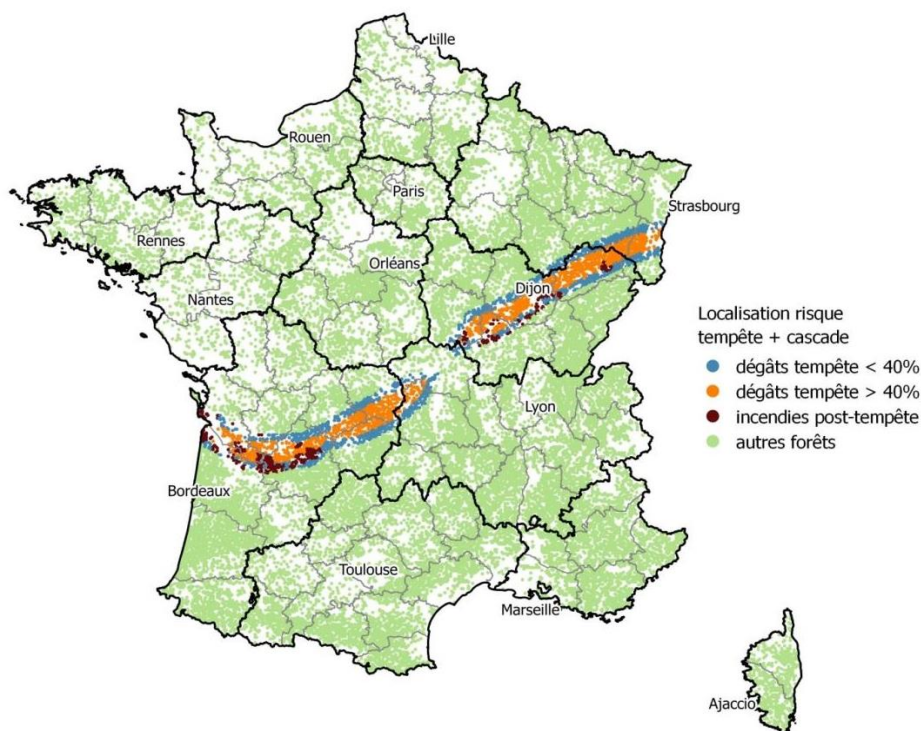


Figure 4.2 : Tracé de la tempête proposé pour l'étude et localisation des incendies post-tempête

L'analyse des dommages en raison des pullulations de scolytes pour les pins et les épicéas a fait l'objet d'une recherche bibliographique spécifique selon l'espèce (scolyte sténographe ou typographe). On estime que pour le climat actuel, ces dégâts sont compris entre 6% et 12% selon les espèces de scolyte et la zone de dégâts. Le climat RCP 8.5 modifie les pourcentages de dégâts additionnels liés aux pullulations de scolytes qui sont multipliés par 1,7 (cf. Annexe 10 pp 5-8).

* **Aspect post-crise**

L'expérience des tempêtes récentes montre que les débouchés pour les volis sont limités aux panneaux de particules et au bois énergie et que les volumes récoltés sont de moindre qualité (cf. Annexe 12, Tableau 12.2 p.14). Le stockage de bois pendant quelques années impacte les éclaircies en bois vert pendant cette période. Les exportations sont plus fortes mais, de manière générale, les prix s'effondrent. On constate aussi une diminution des récoltes dans les régions non impactées limitrophes concomitante à un arrêt des récoltes en bois vert dans les zones impactées

1.2.3. Invasions biologiques

* **Description de la crise**

On envisage une invasion biologique (champignon ou insecte) entraînant une forte mortalité des recrues, une mortalité plus modérée des adultes et d'importantes pertes de croissance, commençant dès le début de la période et se propageant ultérieurement à travers l'ensemble du pays. La dispersion du parasite de même que la dynamique de mortalité et de perte de croissance en fonction de son temps de présence ont été calés sur celles observées dans le cas de la chalarose du frêne en France.

Une des particularités de la crise « invasion biologique » est qu'il n'y aura pas d'interaction avec les autres risques (sécheresses, tempêtes ou incendies) et qu'elle n'entraînera donc pas de cascade de risques. De ce fait, ce scénario d'invasion biologique ne sera simulé que pour le scénario « climat actuel » mais elle sera dimensionnée de façon à impacter des essences d'importance majeure.

Deux types d'invasion biologique ont été simulées, une sur chênes et une sur pins, avec, pour chacune d'entre elles, deux niveaux de sévérité en impactant un nombre croissant d'essences. Pour les chênes, le scénario sévère impacte les chênes pédonculés, sessiles et pubescents tandis que la version plus modérée du scénario n'impacte que le chêne pédonculé. Pour les pins, le scénario sévère impacte les pins d'Alep, maritimes, noirs et sylvestres tandis que le scénario plus modéré n'impacte que le pin maritime *P. pinaster*.

* **Aspects temporels et spatiaux**

La vitesse de progression choisie pour simuler l'invasion est de 50 km par an. Le départ de cette invasion a été situé dans le N-NE de la France pour la crise affectant les chênes ou dans le sud pour celle affectant les Pins, avec de multiples foyers initiaux (cf. Figure 4.3).

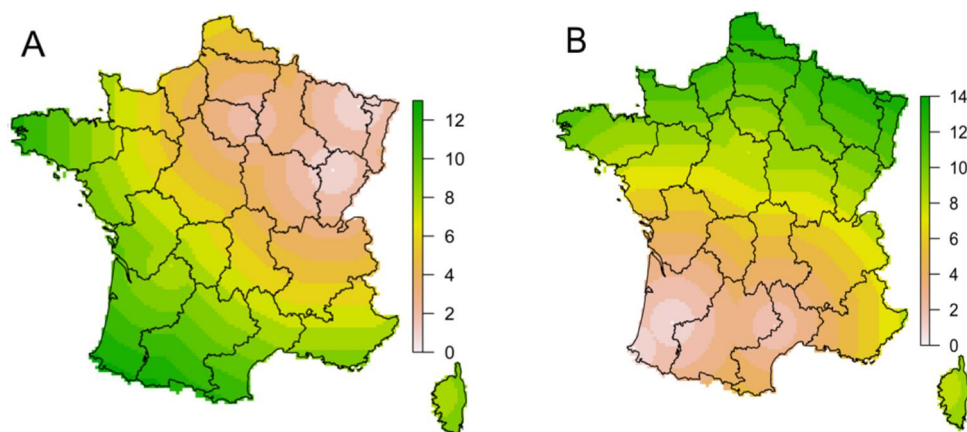


Figure 4.3 : Diffusion temporelle et spatiale de la présence du parasite invasif induisant la crise. A. Chênes, B. Pins.

Les strates du modèle MARGOT sont impactées selon la proportion de points IFN constituant la strate touchée par le parasite invasif et selon la durée de sa présence. Seule une partie des essences de la strate est touchée par l'invasion (pins ou chênes).

* **Impacts sur la forêt**

Les impacts seront d'abord des pertes de croissance, calibrées en s'inspirant du cas de la chalarose, parasite du frêne. Ces pertes sont calculées en fonction du dépérissement provoqué qui dépend du temps de présence du parasite. La mortalité qui est importante dépend du diamètre des arbres considérés, elle est forte pour des arbres dans la catégorie 5-25 cm de diamètre et plus modérée pour des arbres de diamètre supérieur à 25 cm. La régénération de la strate impactée se fait par transfert vers les autres essences de la strate. La forte mortalité des semis liée à l'invasion est donc prise en compte de façon indirecte et conservative (cf. [Annexe 12 pp. 23-25](#)).

La sévérité de la crise dépend des 3 éléments suivants :

- **Vitesse de l'invasion** : Il fallait dimensionner une crise d'invasion réaliste, mais ayant un fort impact. Nous avons donc choisi une vitesse de progression de l'invasion forte, de 50 km par an comme dans le cas de la chalarose. De multiples foyers initiaux ont été simulés, ce qui est souvent observé dans les invasions biologiques.
- **Importance des essences impactées** : Les essences impactées, chênes ou pins sont déterminantes dans la sévérité de la crise. Les essences occupant une large surface dans une région donnée présentent à la fois une diversité génétique et un cortège parasitaire (insectes, microorganismes) plus élevé. Elles ont plus de chances d'avoir déjà été affectées par un parasite phylogénétiquement proche du parasite invasif et donc de présenter de la résistance *ex ante*. De même, il y a plus de chance qu'il y ait présence d'ennemis naturels du parasite invasif (prédateurs, parasitoïdes, mycoparasites, mycovirus) dans l'écosystème envahi. Ceci ne supprime toutefois pas le risque, il existe des parasites connus présentant une agressivité très forte sur nos pins / chênes. Un exemple classique est l'agent de l'Oak wilt, *Ceratocystis fagacearum*, champignon proche de l'agent de la graphiose de l'orme qui présente une très forte agressivité sur nos principales espèces de chênes.
- **Niveau des pertes de croissance et de la mortalité** : L'impact du parasite en termes de perte de croissance et de mortalité est le facteur déterminant la sévérité de la crise pour lequel nous disposons de peu d'informations pour dimensionner la crise. On a simulé des pertes de croissance fortes, correspondant à un parasite qui a atteint une prévalence / sévérité très forte mais ayant un impact moyen sur la croissance. La mortalité est, elle aussi, assez forte. Toutefois, elle est très inférieure à ce qui a été observé dans le cas de la graphiose de l'orme et légèrement inférieure à ce qui est observé pour le Sudden Oak death en Californie.

I.3. Synthèse des scénarios de crises analysés et leur implémentation dans la modélisation

Chacun des types de crises décrites ci-dessus aura des impacts différenciés sur les dynamiques forestières et les filières associées, ces impacts pourraient en outre varier selon le scénario de gestion et la sévérité du changement climatique (lorsque l'ampleur de la crise dépend directement du changement climatique). Dans la mesure où les invasions biologiques n'ont pas été spécifiquement ici reliées au changement climatique, ni en termes de

déclenchement, ni en termes d'impacts, les conséquences de ce type de crise ne seront examinées que sous « climat actuel », leur combinaison avec une accentuation des effets du changement climatique se traduisant par un simple effet d'échelle. Pour des questions de dimensionnement de l'exercice, seuls deux scénarios de gestion ont été mobilisés ici, à titre illustratif : le scénario « Extensification » et le scénario « Dynamiques territoriales ».

Ainsi, 12 cas de figures, résultat du croisement des types de crises prises en compte avec les scénarios de gestion retenus et les options climatiques, ont été examinés et simulés (cf. [Tableau 4.1](#)).

Tableau 4.1 : Matrice synthétique des différents scénarios simulés et analysés, croisement gestion forestière x climat x crises

		Extensification allègement des prélèvements	Dynamiques territoriales
Climat actuel	Incendies	*	*
	Tempête Scolytes Incendies	*	*
	Invasion biologique résineux Sévère : tous les pins	*	*
	Invasion biologique résineux Uniquement pin maritime	*	*
	Invasion biologique feuillu Sévère : tous les chênes	*	*
	Invasion biologique feuillu Uniquement chêne pédonculé	*	*
RCP 8.5	Incendies	*	*
	Tempête Scolytes Incendies	*	*

II. Dégâts causés par les crises majeures et effets sur le bilan carbone de la filière forêt-bois française.

Les dégâts provoqués par la crise incendiaire intervenant entre 2026 et 2030 doublent entre l'option climatique actuelle et RCP 8.5 : la surface passe de 75 000 à 175 000 ha et le volume de mortalité supplémentaire de 15 à 36 Mm³.

Une cascade de crises tempête-scolytes-incendies affecterait 9 % de la surface (700 000 ha gravement, autant en dégâts diffus). En volume, les dégâts seraient les mêmes pour les deux options climatiques, et varient légèrement entre les deux scénarios de gestion (330 Mm³ pour « Extensification » contre 324 Mm³ pour « Dynamiques territoriales »). Il faut noter que la quasi-similitude des dégâts entre options climatiques masque une répartition différente des impacts : beaucoup de chablis sous climat actuel, tandis que les incendies faisant suite à la tempête détruisent deux fois plus de volume sous RCP 8.5. Cette crise est environ deux fois plus grave que Lothar-Martin.

Les crises biotiques affectent tout le territoire, leur gravité dépend du nombre et de l'importance initiale des espèces touchées : 120 Mm³ si le Pin maritime seul est affecté, environ 350 Mm³ si on se réfère à tous les Pins ou du Chêne pédonculé, environ 800 Mm³ si les 3 grands chênes sont touchés. Le climat n'intervenant pas dans la définition de la crise, seuls les scénarios de

gestion peuvent se différencier en matière de dégâts : le scénario « Extensification » se distingue de « Dynamiques territoriales » par seulement + 5 % de dégâts. Enfin, il faut ajouter que des dégâts d'origine biotique apparaissent progressivement dans le temps et de manière plus ou moins diffuse dans l'espace, ce qui permet de prévenir des dommages collatéraux et de gérer les conséquences de manière plus « lisse » que dans les cas précédents.

Dans les trois cas, les écarts entre les 2 scénarios de gestion simulés restent modestes, résultat sans doute lié à une faible différenciation des situations entre scénarios du fait d'un déclenchement toujours précoce des crises, ce qui permet aux peuplements de se reconstituer à horizon 2050.

Les mécanismes post-crise que nous avons représentés, concernent surtout l'écosystème. L'effet de rétroaction entre surface terrière et recrutement provoque une forte augmentation de la régénération dans les sous-domaines endommagés. Ceux entièrement détruits par la crise (incendies, zone cœur de la tempête, etc.) sont remis en production 10 ans après¹⁵, le recrutement correspondant alors à celui des nouveaux boisements. La Figure 4.4 montre que la perte de volume n'est que très progressivement compensée par une régénération plus importante.

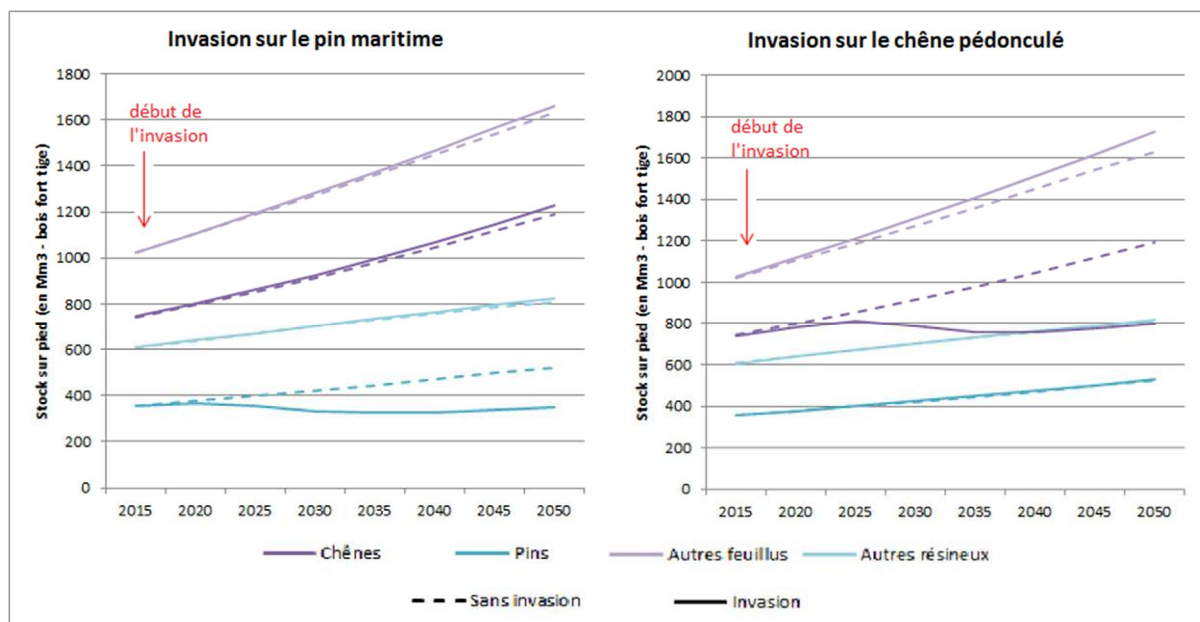


Figure 4.4 : Evolution du stock sur pied par groupe d'essence selon le scénario d'invasion biologique (cas du scénario de gestion « Dynamiques territoriales »)

En raison de l'absence de connaissances précises sur le comportement des acteurs suite à ce type de catastrophes, une adaptation « post-crise » *a minima* de la gestion sylvicole a été implémentée. Ainsi, les types de peuplements actuels et les pratiques courantes de gestion sont conservés (pas de reconversion des peuplements, pas de modification des itinéraires sylvicoles post-crisis), sauf pour les crises biotiques pour lesquelles nous avons supposé que le renouvellement se faisait avec les essences d'accompagnement (principalement des feuillus secondaires). Dans la réalité, des dégâts aussi considérables auraient sans doute des impacts sur la gestion sylvicole, avec, comme dans le cas de la chalarose du frêne, une reconversion de certains peuplements ou une adaptation des coupes et des itinéraires de

¹⁵ Délai de 10 ans pour tenir compte des conditions du terrain après perturbation (encombrement par les chablis, etc.) et du diamètre de pré-comptage de l'inventaire forestier (7,5 cm).

gestion. Ainsi, 2 214 000 ha (14 % des forêts françaises) pour le chêne pédonculé, 5 366 000 ha (34 % des forêts) pour les 3 chênes, 1 195 000 ha (8 % des forêts) pour le pin maritime et 2 772 000 ha (18 % des forêts) pour les 5 pins pourraient potentiellement être concernés. Difficilement paramétrables dans le temps du projet, ces mécanismes peu documentés n'ont pas été pris en compte.

La surmortalité a été répartie entre une partie valorisée économiquement et une partie restant à l'écosystème sous la forme de bois mort, selon des taux arbitraires dépendant du scénario en lien avec les capacités de la filière à absorber des quantités de bois exceptionnelles et/ou des coupes sanitaires. La partie valorisée a été fixée à 40 % dans le scénario « Extensification » contre 70 % en « Dynamiques territoriales », et entraîne une hausse de la récolte en BI et BE pour l'essence impactée avant un épuisement progressif de la ressource concernée. Ces taux gagneraient à faire l'objet d'un approfondissement, en combinant l'expertise actuelle et une analyse économique (prix des bois, niveau de gestion).

On trouvera rassemblés en [Annexe 13](#), les résultats obtenus dans chacune des situations de crise analysées sur (i) le stockage de carbone en forêt (cf. [Annexe 13 pp. 6-9](#)), (ii) le stockage de carbone dans les produits bois (cf. [Annexe 13 pp. 13-16](#)) et (iii) sur les effets de substitution (cf. [Annexe 13 pp. 20-23](#)). Ils font tous ressortir les mêmes ressorts de réaction à la crise introduite dans la dynamique forestière : quelle que soit la forme de la crise, la baisse du stockage annuel de Carbone dans les bois sur pied, plus ou moins conséquente selon les scénarios, est, dans un premier temps, au moins partiellement compensée par un regain de stockage dans les bois morts et par des effets de substitution accentués par l'accroissement des disponibilités dû à la crise. A ce mécanisme, se surajoute, notamment dans le cas du scénario « Dynamiques territoriales », un stockage marqué dans les produits bois.

Commençons par les crises biotiques. Les essences impactées, chênes ou pins, ainsi que la sévérité de l'attaque, sont déterminantes dans l'ampleur des dégâts et donc des effets de la crise sur le bilan carbone. Dans le cas où les pins sont affectés, le comportement du bilan de carbone au fil du temps est assez proche, aussi bien vis-à-vis des scénarios de mobilisation que de la gravité de l'invasion. En bilan cumulé sur toute la période 2016-2050, l'impact serait ainsi le suivant si l'invasion ne touchait que les pins maritimes : le stockage en forêt, cumulé d'ici 2050, diminuerait de moins de 5 % (cf. [Figure 4.5](#)) et les émissions évitées resteraient inchangées (cf. [Figure 4.6](#)). Il y a en outre davantage de stockage-produits et d'effets de substitution avec « Dynamiques territoriales », néanmoins le bilan reste dominé par le stockage dans la biomasse feuillue.

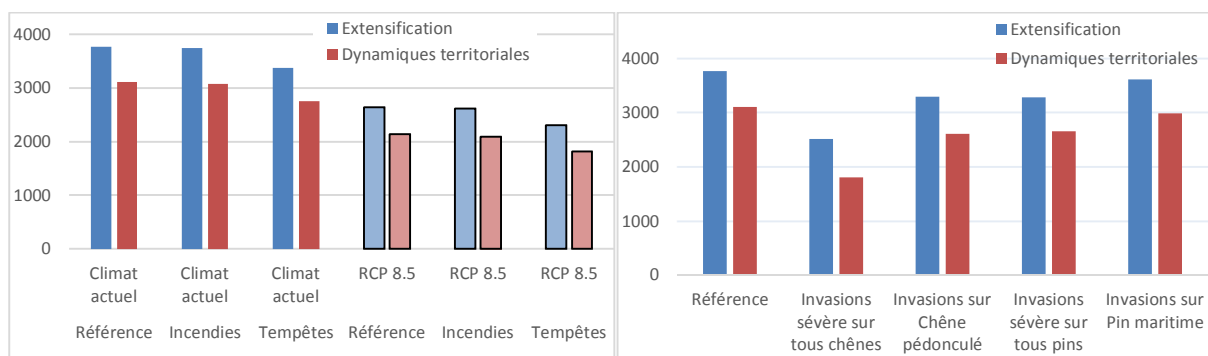


Figure 4.5 : Stockage de carbone dans l'écosystème forestier cumulé sur la période 2016-2050 pour les scénarios de gestion « Extensification » et « Dynamiques territoriales » avec crises (en MtCO₂ eq).

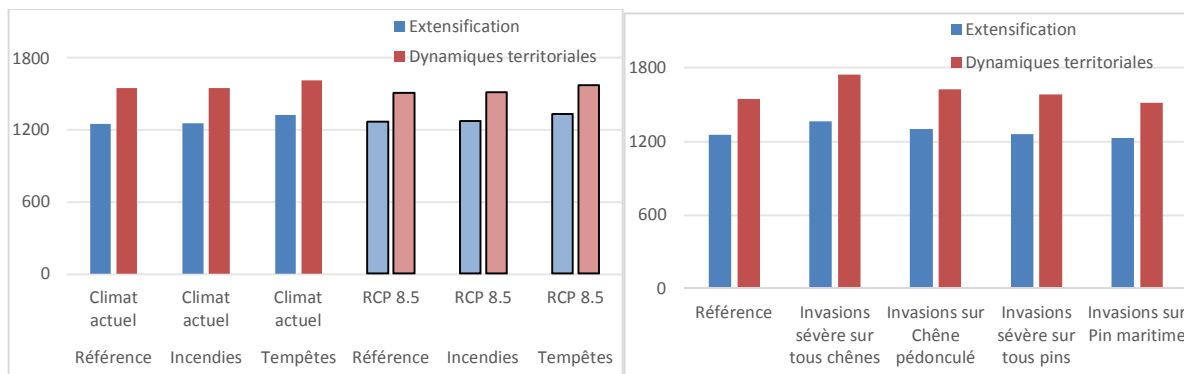


Figure 4.6 : Emissions de GES évitées par effet de substitution cumulées sur la période 2016-2050 pour les scénarios de gestion « Extensification » et « Dynamiques territoriales » avec crises (en MtCO₂ eq).

Lorsque les chênes sont touchés, l'impact sur les différentes composantes du bilan carbone est nettement plus visible, notamment quand tous les chênes sont touchés (cf. Figure 4.7). Les pertes de chêne par mortalité sont suffisantes pour affaiblir la vitesse de stockage, voire basculer vers une réduction de la biomasse feuillue. Ainsi, le stockage annuel de carbone dans la biomasse feuillue diminue fortement dès la période 2021-2025 et il devient même négatif sur les deux périodes suivantes. Dans ce cas, l'ensemble des autres leviers, que déclenchent notamment la crise, compensent la forte perte de chênes : bois-mort, stockage-produits et effets de substitution. Le surcroît de stockage dans le bois mort ne suffit cependant pas à maintenir le stockage annuel en forêt et, pris globalement sur la période 2015-2050, le stockage cumulé sous climat actuel diminue d'un tiers dans le scénario « Extensification » et de 42 % dans le scénario « Dynamiques territoriales » (cf. Figure 4.5). Dans le même temps, le stockage de carbone dans les produits bois et les émissions évitées par effet de substitution, qui ont fortement augmenté lors des périodes durant laquelle la crise a sévi, se sont au total insuffisamment accrus pour compenser l'ensemble des pertes liées au déstockage en forêt : + 9 % en effet de substitution cumulé 2016-2050 dans le cas du scénario « Extensification » et + 12 % dans celui du scénario « Dynamiques territoriales » (cf. Figure 4.6).

Au niveau national, l'impact d'une crise « Incendies après sécheresse » sur le bilan carbone serait absorbé et passerait presque inaperçu dans la variabilité entre années. Sous hypothèse de climat actuel, la croissance du stockage de carbone en forêt subit un simple ralentissement. En cas de dégradation plus accentuée du climat (RCP-8.5), les dégâts en forêt sont plus conséquents, la surface brûlée étant, dans ce scénario climatique, multiplié par 2,4 par rapport au scénario en climat actuel. L'impact global reste cependant limité, les autres compartiments de la filière jouant pleinement leur rôle d'amortisseur. Le stockage en forêt cumulé sur toute la période 2016-2050 est de moins de 1 % inférieur au scénario sans crise dans tous les cas, sauf dans le cas de figure « Dynamiques territoriales » en climat 8.5 où l'écart à la situation sans crise est de 3 % (cf. Figure 4.5). Dans ce cas, une légère croissance des effets de substitution vient compenser cette légère perte (cf. Figure 4.6).

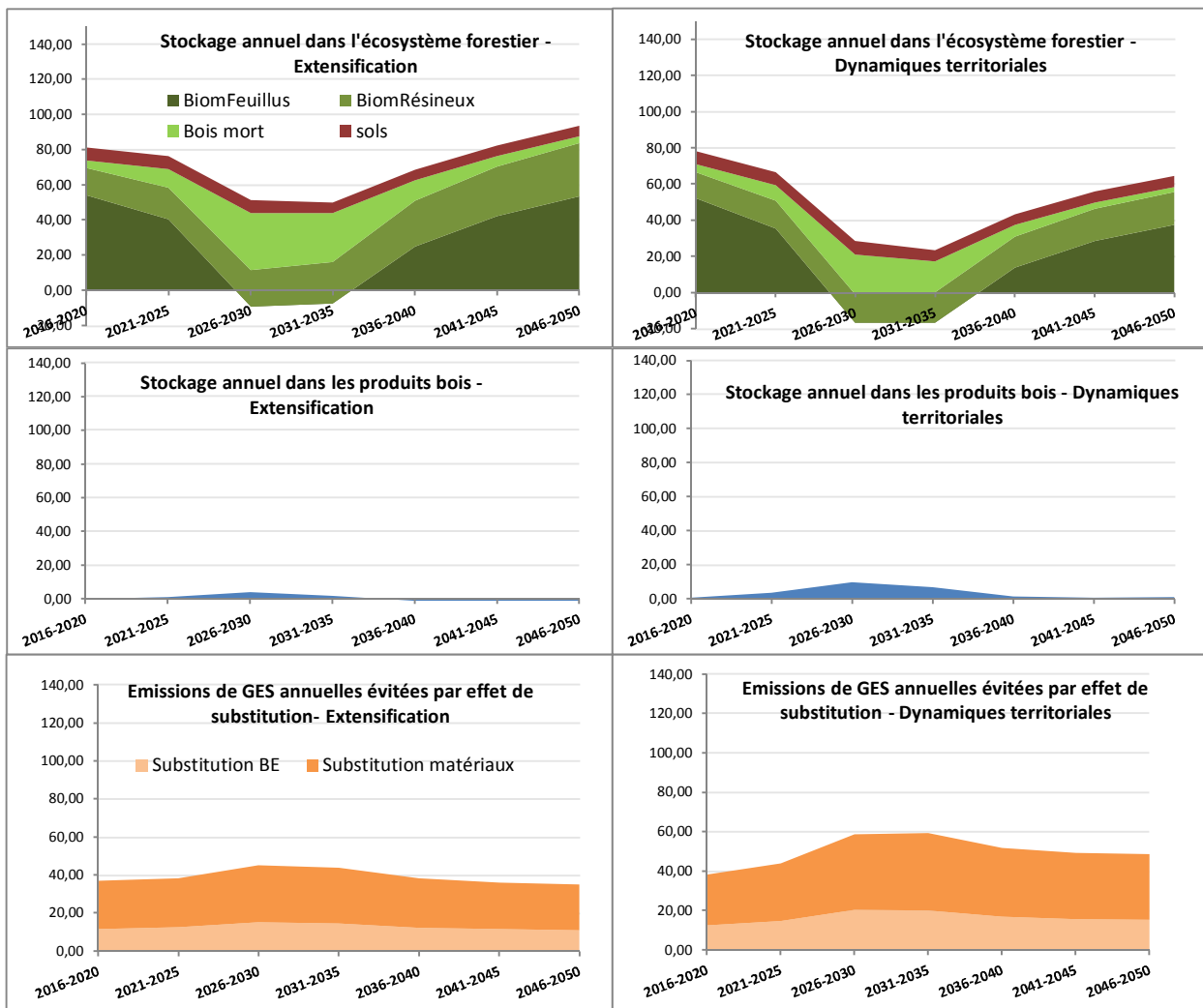


Figure 4.7 : Impact d'une invasion biologique touchant tous les chênes sur le bilan carbone : Stockage de carbone annuel (en forêt et en produits bois) et Emissions de GES évitées par effet de substitution, en MtCO₂eq/an, selon les scénarios de gestion « Extensification » et « Dynamiques territoriales » et en climat actuel.

Rappelons toutefois que, par souci de simplification des analyses, une seule crise « Incendies après sécheresse » a été positionnée pendant la période d'étude. Un scénario plus probable verrait la répétition de crises de ce type à chaque sécheresse significative. En particulier, en cas d'aggravation des effets du changement climatique (RCP 8.5), on s'attend à un climat extrême avec une succession d'années sèches comme la suite 2003-2006. Chaque crise serait certes de moindre ampleur que celle simulée ici, mais le cumul de leurs effets pourrait être supérieur, sans compter l'effet déstabilisant pour le monde forestier et sa filière de cette récurrence pouvant déboucher sur une aversion à entreprendre paralysant les initiatives.

A l'inverse, avec une crise Tempête et ses complications (Cascade tempêtes-scolytes-incendies), le stockage dans la biomasse (aussi bien feuillue que résineuse) s'annule pendant les 5 ans de crise (cf. Figure 4.8), comme on l'a constaté lors de Lothar-Martin. En revanche, une compensation immédiate s'opère par l'accumulation de bois-mort et de produits bois, amplifiée par une hausse des bénéfices de substitution. Ainsi, par exemple, dans le scénario « Dynamiques territoriales » en climat actuel, le stockage en forêt chute brutalement de près de 84 MtCO₂ eq/an au cours de période 2021-2025 à 33 MtCO₂ eq/an juste après le passage de la

tempête, 2026-2030. Le choc sur la biomasse forestière est quelque peu compensé, dans l'écosystème forestier lui-même, par un excès de bois mort qui conserve en forêt une partie du carbone. Parallèlement, du fait d'une mise en marché importante de bois à transformer, le stockage de carbone en produits bois et les effets de substitution augmentent fortement, à la suite du choc : de 75 % pour les émissions de GES évitées et d'un facteur 10 pour le stockage en produits. Le choc est encore plus rude lorsque l'on considère l'option climatique dégradée (RCP 8.5) : on passe alors à un déstockage de carbone dans la biomasse forestière. Corrélativement, le stockage en bois mort est multiplié par près de 4 et les effets de substitution et le stockage dans les produits bois font, l'un et l'autre, un bond spectaculaire.

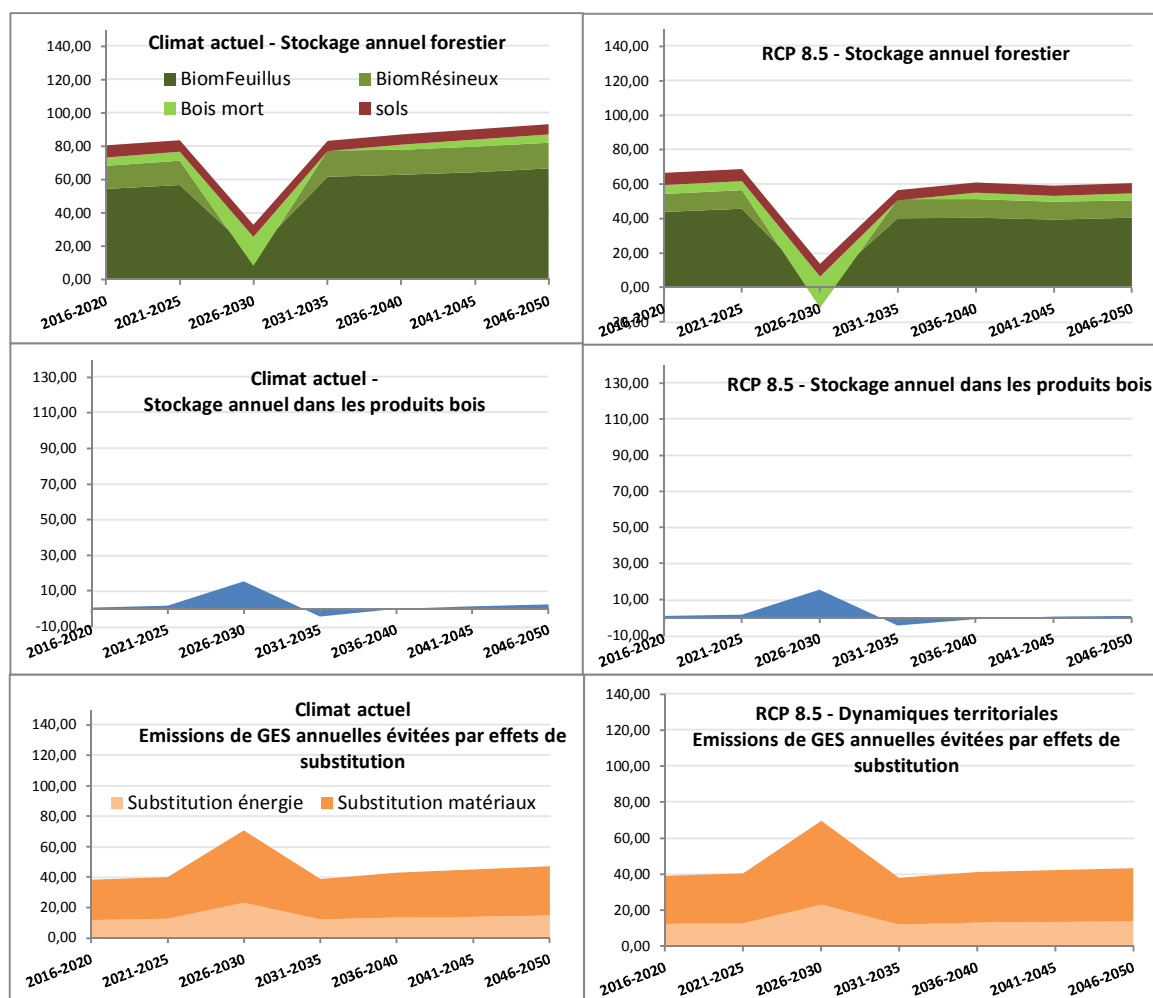


Figure 4.8 : Impact d'une tempête suivie de pullulations de scolytes et d'incendies sur le bilan carbone : Stockage de carbone annuel (en forêt et en produits bois) et Emissions de GES annuellement évitées par effet de substitution, en MtCO₂e/an, selon le scénario de gestion « Dynamiques territoriales », en climat actuel et en climat RCP 8.5.

Au total, la compensation est presque complète dans les deux scénarios de gestion considérés lorsque l'on reste en climat actuel, les niveaux de stockage annuel des périodes avant crise (2021-2025) et de crise (2026-2030) tendant à rester identique. Le niveau de stockage annuel a néanmoins tendance à chuter dans les situations où le climat suit la trajectoire RCP 8.5 mais cette chute se limite à environ -10 %. Les périodes suivantes retrouvant des tendances de croissance du stockage annuel ou des effets de substitution proches de celui d'avant crise, le stockage cumulé sur toute la période 2016-2050 est inférieur de 5 à 6 % à ce qu'il serait sans intervention de la tempête et de ses suites (cf. Figures 4.5 et 4.6).

* *
*
*

En conclusion, les différentes histoires de crise impactent le bilan de carbone national selon des modalités très contrastées, selon la nature de la crise, les cibles affectées, la sévérité et la dynamique du phénomène.

Une année de recrudescence d'incendies, même deux fois plus sévère que 2003, aurait un très faible impact national ; en revanche, une crise enclenchée par une tempête deux fois plus grave que Lothar-Martin (en volume de chablis-volis), avec des complications dues à des pullulations de scolytes et incendies, aurait un impact de -15 % sur le bilan de carbone national, qui se résorberait en 20 ans environ ; une crise biotique aurait des conséquences plus étalées, tout au long de la période, les plus sévères étant celles touchant l'ensemble des chênes et faisant mourir ou affaiblissant jusqu'à 800 Mm³ cumulés sur 20-30 ans (jusqu'à -20 % sur le bilan de carbone).

Le bilan carbone est très sensible à la composante feuillue de la ressource ; la récupération après crise est plus lente sous climat RCP 8.5 que dans les conditions actuelles, pour l'ensemble des composantes qui y contribuent (bois-mort, produits et substitution).

Avec une perturbation, même très violente, on ne parvient pas à bien discriminer les deux scénarios de gestion simulés ici. On peut faire l'hypothèse que cela est dû au fait que l'occurrence des dommages a été fixée arbitrairement vers le début de la période simulée, afin de ne pas observer les conséquences jusqu'en 2050, le prix à payer étant que les scénarios de mobilisation/gestion ont alors peu divergé.

Les dimensions économiques et sociales de la gestion de crise ont été traitées très sommairement dans cette partie du travail : d'une part, nous n'avons que partiellement pu simuler la dynamique post-crise pour les forêts (surtout en régénération) ; d'autre part, nous avons considéré que la fraction des dommages valorisée en produits serait de 40 % sous scénario « Extensification » et 70 % sous « Dynamiques territoriales », sans être vraiment capables d'évaluer le réalisme de telles hypothèses, dans la mesure où les dommages considérés sont d'une ampleur inédite.

Les crises sanitaires sont effectivement de nature à affaiblir, annuler, voire inverser, pour plusieurs années la vitesse d'accumulation de carbone dans la biomasse forestière. Tant que les peuplements et leurs gestionnaires ont la capacité de réagir à la bonne échelle, cet impact devrait rester inférieur à 15 ans (ce qui reste néanmoins important). Le changement climatique, qui affaiblit la croissance, accentue la mortalité et augmente la fréquence et la gravité des crises sanitaires, représente de fait un important facteur de risque, notamment pour les stratégies privilégiant le stockage de carbone en forêt.

Compte tenu de la dimension (en hectares et en Mm³/an) des crises analysées, on peut penser que les pratiques actuelles de prévention et préparation aux crises (Gauquelin *et al.*, 2010) ne sont pas à la bonne échelle. Ne serait-ce que pour augmenter la résilience de leurs systèmes de gestion, les forestiers gagneraient à renforcer leur entraînement à de tels événements.

DISCUSSION, CONCLUSIONS ET BESOINS DE RECHERCHE

La démarche mise en œuvre ici pour analyser les leviers qui pourraient être activés dans les décennies à venir pour améliorer la contribution, déjà importante, de la filière forêt-bois française à l'atténuation du changement climatique, se veut la plus complète possible et, de ce fait, mobilise de larges compétences pluridisciplinaires pour balayer les multiples dimensions de la question. Elle présente ainsi plusieurs originalités, peu mises en œuvre dans les travaux déjà réalisés sur cette question (Nabuurs *et al.*, 2015 ; Lundmark *et al.*, 2014 ; Pingoud *et al.*, 2010 ; Schwarzbauer & Stern, 2010 ; Thürig & Kaufmann, 2010) : prise en compte simultanée des dynamiques forestières, des dynamiques de filières et des dynamiques économiques à l'horizon 2050, intégration des impacts du changement climatique et des crises majeures pouvant affecter les forêts françaises, etc.

Se interrogeant, sur les coefficients techniques à mobiliser pour conduire des comptabilisations carbone de l'ensemble de la filière et sur les dynamiques forestières et économiques, elle met en lumière les multiples incertitudes inhérentes à ce type de démarche. Ces dernières sont de diverses natures : limitation dans les versions actuelles des modèles existants lorsqu'ils sont mobilisés à des horizons plus lointains qu'à l'ordinaire (MARGOT et l'absence de prise en compte des effets de densité des peuplements ; FFSM et l'absence de module d'investissements, par exemple) ; difficultés d'articulation entre modèles (démographiques et à base de processus, par exemple) ; plage de variabilité des coefficients techniques (substitution, demi-vies, etc.) et facteurs de leurs possibles évolutions ; etc.

Parmi ceux-ci, l'étude permet de mettre l'accent sur les questions d'évaluation des effets de substitution, notamment relatifs au bois-matériau. La plage de variation très large des coefficients relevés dans la littérature se explique par la diversité des produits bois ou concurrents concernés et la multiplicité des technologies et contextes énergétiques à considérer. Une évaluation rigoureuse de ce compartiment nécessite une décomposition plus fine de la filière et de ses produits et un approfondissement des méthodes d'évaluation des émissions des différentes filières de production concurrentes servant de référence. C'est à cette condition que des hypothèses sur leur évolution pourraient être formulées en tenant compte des possibles évolutions technologiques déformant le différentiel d'émissions évitées entre les produits bois et leurs produits concurrents.

En se positionnant à l'horizon 2050, horizon à la fois proche pour les dynamiques forestières et lointain pour les dynamiques économiques, sociales et technologiques, nous avons fait le choix de simuler les effets sur le bilan carbone de trois scénarios de gestion forestière à la fois contrastés entre eux et cohérents en leur sein. Cette démarche prospective, rarement utilisée dans le domaine (de Menhière *et al.*, 2016)¹⁶ a été prolongée, d'une part, par la collaboration d'un plan de reboisement réaliste et adapté aux contraintes des forêts françaises et, d'autre part, par la mise en œuvre d'un plan de simulation articulant trois modèles spécifiques :

- la mobilisation du modèle de ressource de l'IGN, calibré pour simuler les dynamiques forestières à des horizons rapprochés, a été poussée jusqu'à ses limites, ce qui a permis de mettre en évidence qu'une des clés d'amélioration des comptabilisations carbone à des horizons lointains réside dans les capacités des modèles à représenter des comportements de peuplements forestiers conduits à des densités très variées sur des durées de vie très longues ;

¹⁶ Une exception notable en la matière est le travail déjà ancien réalisé par l'INRA (Sébillotte *et al.*, 1998).

- parallèlement, nous avons mobilisé un modèle économique de la filière pour mieux appréhender les dynamiques de récolte possibles en fonction des capacités des marchés : au-delà des résultats économiques qui en ressortent, cet essai met en lumière que, si l'objectif est d'accroître les usages des produits bois, celui-ci ne peut être envisagé que s'il y a une évolution fondamentale, d'une part, des préférences des consommateurs en faveur des produits bois et, d'autre part, des structures industrielles en aval de la filière et un renforcement de ses capacités de transformation et de mise en marché des produits les plus vertueux ;
- la prise en compte des effets du changement climatique a nécessité le recours à des principes de modélisation, basés sur des processus biologiques en complément de la modélisation IGN basée sur des processus statistiques et démographiques. L'articulation entre ces deux types de modèles, qui a permis ici de simuler les effets du changement climatique sur les dynamiques forestières, invite à prolonger le travail dans cette direction afin de mieux appréhender les modes de réaction des forêts à des conditions à ce jour inconnues et donc non observées ;
- dans une optique similaire, il a été considéré comme nécessaire, pour explorer les évolutions de la forêt française et de sa contribution à l'atténuation du changement climatique, d'envisager des crises biotiques ou abiotiques majeures qui pourraient changer grandement les termes de l'arbitrage entre stockage en forêt et stockage et substitution dans le reste de la filière. Cette démarche, jamais tentée à cette échelle, met en lumière tout l'intérêt mais aussi toutes les difficultés qu'il y a à documenter et simuler la multitude des risques et des cascades de risques envisageables.

En dépit des incertitudes et des limites des connaissances et des outils disponibles, il ressort de cette étude que le bilan de carbone complet de la filière forêt-bois inclut des phénomènes de report et de compensation (entre les différents stocks, entre stocks et substitution) qui lui assurent une certaine stabilité : même si tel ou tel compartiment (par exemple, la biomasse d'un groupe d'espèces affectée par une très profonde crise sanitaire biotique) peut connaître des phases temporaires à bilan négatif (c'est-à-dire une perte nette de carbone), le bilan consolidé sur la période reste positif. Son ordre de grandeur (90 à 150 millions de tonnes CO₂eq par an) fait de la forêt et de la filière forêt-bois un acteur majeur pour le bilan national de gaz à effet de serre (25 à 30 % du total des émissions brutes). Par comparaison, un travail analogue pour la Suède (Lundmark *et al.*, 2014), consolidant les effets nationaux et ceux des produits exportés, a permis d'estimer un effet d'atténuation de la forêt suédoise de 60 MtCO₂ eq/an, valeur qui pourrait être augmentée de 40 MtCO₂ eq/an par une politique de stimulation de la croissance et de la mobilisation.

C'est, pour une grande partie, le résultat de la dynamique générale d'extension en surface et d'accumulation de bois sur pied dans laquelle se trouvent les forêts françaises de métropole. En effet, elles continuent de progresser en surface et chaque hectare forestier, en moyenne, continue de se capitaliser en volume, sous l'effet conjugué de la maturation des surfaces forestières « récentes » (constituées au cours des 50 dernières années) et d'une gestion peu active sur de larges territoires essentiellement privés ou communaux. Ces phénomènes ont une forte inertie, avec des constantes de temps de plusieurs décennies, ce qui explique que même les très fortes perturbations que nous avons simulées, anthropiques ou naturelles, finissent par être absorbées complètement ou très largement sur la période 2015-2050. De cette forte inertie et résilience d'ensemble des écosystèmes forestiers, il ne faudrait néanmoins pas déduire qu'elles sont des propriétés intrinsèques de l'écosystème. Elles traduisent probablement aussi une conjoncture historique singulière aussi bien sur les plans écologiques

qu'industriels et sociaux : (i) après un « minimum historique » situé au début du 19^{ème} siècle, les forêts françaises de métropole sont encore en train de se reconstituer, y compris dans leur compartiment « sol » stockant actuellement du carbone à un rythme proche de 4 tC/ha/an ; (ii) les usages pour lesquels les forêts étaient jadis très exploitées ont été supplantés par les énergies fossiles, le béton et les métaux ; (iii) l'urbanisation rapide de la société a entraîné une certaine déconnexion, géographique et culturelle, de la population vis-à-vis de la forêt en tant qu'espace productif, tandis que la forêt est progressivement vue comme un espace de récréation, de nature, de biodiversité et d'autres services non marchands. Cette conjoncture historique singulière, qui induit aujourd'hui un bilan carbone fortement positif dans la forêt et la filière forêt-bois, pourrait à l'avenir se transformer et le bilan de carbone évoluer : en toile de fond, on peut craindre que la dégradation rapide du climat, notamment sous les scénarios les plus pessimistes du GIEC, pénalise la productivité forestière et augmente la mortalité des arbres. Par ailleurs, l'émergence de crises sanitaires profondes est une des manifestations les plus inquiétantes et émergentes du changement climatique, à la fois par leurs impacts sur les couverts forestiers et par les déstabilisations et transformations qu'elles sont susceptibles de provoquer dans le champ socio-économique. Enfin, la filière forêt-bois est aujourd'hui mise au cœur des débats en tant qu'une des sources principales de la bioéconomie, qui émerge pour substituer des procédés biosourcés à ceux dérivés des ressources fossiles (Roy, 2006). On retrouve bien là l'ensemble des enjeux que nous avons tenté d'articuler dans cette étude.

L'étude met également en évidence que les différents leviers et compartiments considérés (*i.e.* stockage dans la biomasse, le bois-mort et les sols, stockage dans les produits bois ainsi que les émissions évitées par substitution du bois à des procédés concurrents producteurs d'énergie ou de matériau) jouent des rôles complémentaires dans l'impact général de la filière forêt-bois sur le bilan carbone national : par exemple, si l'exploitation des bois connaît un pic, du fait de la résorption des chablis provoqués par une tempête, le ralentissement induit sur le stockage dans la biomasse est largement compensé par des phénomènes jouant en sens contraire (bénéfice immédiat en termes d'émissions évitées par l'usage des bois et/ou stockage massif en bois-mort pour les bois endommagés que les acteurs ne parviennent pas à sauver). Ce mécanisme de compensation entre stockage en forêt et substitution dans la filière amène à insister sur l'intérêt de représentations aussi complètes que possible du problème (écologique, industriel et socio-économique : Petersen & Solberg, 2005), alors que la seule considération des stocks en forêt, sur lesquels se focalise en général l'attention, peut donner une vision biaisée de l'impact des forêts et de la filière forêt-bois.

L'effet du scénario climatique RCP 8.5 peut se résumer par un ralentissement généralisé de la croissance et une forte accentuation de la mortalité. A l'échéance 2050, de telles conditions paraissent néanmoins compatibles avec une forte progression du niveau de récolte, telle qu'envisagée dans le scénario « Intensification » par référence à la récolte actuelle, ce qui permet en termes de contribution à l'atténuation, de amortir la chute des capacités de stockage en forêt. Néanmoins, les hypothèses considérées sont assez drastiques en ce qui concerne l'impact du climat sur la dynamique des forêts. Ainsi, l'évolution des forêts feuillues a été contrainte par des forçages climatiques calibrés pour le hêtre, une espèce plus sensible à la sécheresse que la majorité des essences feuillues. Une calibration plus spécifique permettrait certainement de mieux caractériser l'impact différencié par grands types d'essences (chênaies de l'ouest, pineraies de plaine, hêtraies montagnardes ou de plaine, sapinières, pessières...) et de conseiller les priorités en matière de mesures d'adaptation au changement climatique.

En matière de crises, nous avons simulé des situations très pénalisantes : d'une part, nous avons cherché à obtenir un ordre de grandeur des dommages supérieurs aux précédents

historiques récents (Lothar-Martin, Klaus, sécheresse de 2003) ; d'autre part, nous avons volontairement mis le système simulé en péril en choisissant des cibles sensibles sur les plans écologiques et industriels (par exemple, une trajectoire de tempête traversant tout le pays, avec de vastes zones à épicéa et feuillus de qualité, ou encore des crises biotiques affectant précisément les groupes d'espèces à fort potentiel pour l'adaptation au changement climatique, tels que les chênes et les pins). Les taux de récupération des dégâts (valorisation des bois endommagés) sont de 40 % sous scénario « Extensification », de 70 % sous scénario « Dynamiques territoriales ». Sous ces conditions, l'impact des crises pénalise le stockage en biomasse, de façon plus forte et prolongée en cas de crise biotique que de tempête, mais finit par être compensé à l'horizon 2050. Nous ne prétendons pas avoir capté ici l'ensemble des répercussions de telles crises. Dans nos simulations, les crises abiotiques n'interviennent qu'une seule fois d'ici 2050 ; or, c'est leur répétition qui aggraverait probablement les conséquences. Par ailleurs, les processus de valorisation des produits au moment des crises ont été pensés de façon très mécanique. Or, nous aurions plus probablement affaire à une déstabilisation des industries dimensionnées pour une mobilisation lente des ressources, accompagnée d'impacts socio-économiques profonds pour partie liés à la dégradation des paysages correspondants.

Une des originalités de la prise en compte des crises est d'avoir été adoptée une approche multi-risques, qui considère les interactions entre risques. Elle invite à la mise en place d'un réseau national des acteurs académiques et opérationnels sur les risques biotiques et abiotiques en forêt pour approfondir l'analyse.

Nous avons, par ailleurs, tenté d'imaginer un plan de reboisement visant à créer de nouvelles ressources, très productives et facilement mobilisables, pour alimenter la bioéconomie. A l'image des peupleraies cultivées actuelles, l'idée est de consacrer une faible part de la surface forestière à des sylvicultures où l'objectif de production est assumé et bien affirmé (ce qui n'empêche pas les peuplements concernés de fournir, comme c'est le cas des peupleraies, de nombreux autres services écosystémiques). Les essences et variétés proposées ont été renseignées (approvisionnement en plants, itinéraires techniques, performances et risques connus) et leur potentiel localisé par grandes régions écologiques. Nous observons que l'impact d'un tel plan sur le bilan carbone national ne commencerait à devenir significatif qu'après 2050 et pourrait apporter une réponse à la raréfaction anticipée de certaines ressources (par exemple, le douglas au-delà de 2030). Les fiches par espèces peuvent d'ores et déjà être utilisées pour aider la remontée en production des pépinières forestières, après la forte baisse enregistrée de 1990 à 2010. Pour aller plus loin, il serait utile de resituer ce plan parmi les différentes options d'adaptation au changement climatique, notamment sous l'angle de la création variétale, de la diffusion des variétés améliorées et de l'évolution des vergers à graine (Merkle & Cunningham, 2011 ; Nijnik *et al.*, 2013). Le pin maritime et le douglas figurent ainsi comme espèces-pivots, à la fois pour l'adaptation et pour un renforcement de la productivité.

En considérant les contributions relatives des différents leviers, on note que le stockage net dans les produits reste, en toute hypothèse, d'importance faible comparée aux autres leviers. Néanmoins, il faut garder en tête que nous n'avons pas très bien caractérisé les conséquences des usages en cascade du bois et d'une forte prolongation de la durée de vie de ses produits. Toutefois, aussi souhaitables que puissent paraître des progrès de cette nature, il n'est pas évident que la progression du stock de bois immobilisé dans la sphère économique devienne, par elle-même, un puits de carbone majeur. Au-delà de la question des rendements de transformation et de la durée de vie des produits, c'est pendant la phase de transition d'une

société très consommatrice de ressources fossiles à une société utilisant massivement le bois que le stockage peut jouer un rôle important. Ce n'est plus le cas en régime stabilisé (Werner *et al.*, 2010)

En ce qui concerne les sols forestiers, nous avons constaté qu'ils sont actuellement dans un état non-stationnaire caractérisé par une accumulation annuelle de carbone proche du taux de 4 tC/ha/an. Nous avons retenu une valeur forfaitaire de 7 millions de tCO₂ eq/an, qui est peut-être en dessous de la réalité. Il serait très précieux de mobiliser des modèles spécifiques illustrant la manière dont cette dynamique du carbone des sols va réagir à la fois aux changements du climat et des pratiques de gestion, à la fois dans ses modalités extensification, adaptation au changement climatique et développement d'itinéraires techniques innovants dédiés à l'alimentation de la bioéconomie.

La prise en compte du compartiment bois-mort joue un rôle significatif dans l'évaluation d'ensemble des scénarios : en cas de tempête suivie d'une cascade d'autres dommages (scolytes, incendies) ou encore pendant des crises biotiques durant 20 ans à l'image de la crise dendroctone des pins en Amérique du Nord (nous avons simulé une maladie émergente qui affecterait les principaux chênes), on anticipe une forte accumulation dans le compartiment bois-mort qui joue globalement un rôle-tampon important dans le bilan carbone de la filière, surtout si le taux de valorisation effective des bois endommagés est faible (dans le scénario « Extensification », nous avons supposé que 60 % des bois restaient en forêt).

D'un point de vue méthodologique, l'étude a révélé une conclusion fondamentale : pour améliorer la pertinence du modèle MARGOT de l'IGN à chaque fois qu'il s'agit de pousser les simulations au-delà du court ou moyen terme (2030-2035) et/ou de considérer une large gamme de stratégies de gestion/mobilisation, l'introduction de lois densité-dépendantes contrôlant les taux de recrutement, de croissance et de mortalité confère aux projections des comportements dynamiques plus réalistes (non-amplification des perturbations, saturation de la production ou stimulation de la croissance individuelle aux deux extrêmes de la densité relative des peuplements), dont nous avons vu les conséquences pour le choix d'orientations de gestion.

De la même façon, le recours à un modèle comme FFSM, qui a été construit pour répondre à des questions de recherche, peut se révéler hasardeux pour des études à visée directement opérationnelle. FFSM a été mobilisé tel quel pour les besoins de cette étude, qui sont sensiblement différents des problématiques de recherche à l'origine de l'outil. FFSM ne permet ainsi pas de répondre à toutes les questions soulevées par l'étude en particulier dans sa représentativité des agents économiques de la filière. Ainsi, pour des usages à des horizons aussi lointains et sous des hypothèses d'évolution assez radicales, FFSM souffre, comme tous les modèles économiques, de son absence de flexibilité en matière d'élasticité prix, notamment de la demande, pouvant refléter les évolutions des préférences des consommateurs. Par ailleurs, l'endogénéisation des comportements d'investissement des industries des secteurs de l'aval de la filière est également un enjeu important, pas toujours aisé à mettre en œuvre, mais d'autant plus crucial qu'il s'agit d'analyser les capacités d'évolution de la filière sous objectif d'accroissement des capacités de récolte de bois et de mise en marché de produits bois. A ce niveau, une amélioration pertinente serait de distinguer les comportements des consommateurs de produits de seconde transformation (aujourd'hui agrégés dans les fonctions de demande de l'aval de la filière) ainsi que la nature des gestionnaires/propriétaires forestiers (en distinguant les forêts domaniales, communales,

petites propriétés privées et grandes propriétés privées) qui ne réagissent pas aux mêmes déterminants d'offre de la même manière¹⁷.

La combinaison de modèles, telle que tentée dans cette étude, a permis de faire dialoguer différentes communautés scientifiques, en les amenant à « tout mettre sur la table » et nourrir chaque approche par ses interactions avec les autres. Nous avons constaté que, pour l'interface entre modèle de ressource et modèle de processus, une amélioration pourrait consister à diversifier les paramétrages disponibles, ce qui est en soi un défi pour notre pays qui compte au moins une douzaine d'essences forestières importantes. L'interface entre modèle de ressource et modèle économique de filière nationale est moins opérationnelle, et nous avons relevé en particulier un besoin de savoir mieux anticiper des trajectoires dans lesquelles les acteurs adaptent fortement leurs comportements.

En conclusion générale, la argumentation de choix politiques concernant les forêts et la filière forêt-bois s'appuie sur des critères multiples. Le bilan carbone de la filière, même s'il compte parmi les critères importants, doit être mis en balance avec d'autres considérations :

- le degré de vulnérabilité, de résilience et de réversibilité des écosystèmes et de la conduite qui leur est (ou non) appliquée : ainsi, la comparaison des 3 scénarios de gestion nous montre que, pour des niveaux voisins de bilan-carbone agrégé, la contribution relative des stockages et des effets de substitution peut varier fortement. Or, les stocks, en particulier ceux dans la biomasse, sont très sensibles aux perturbations tandis que les bénéfices de substitution sont définitivement acquis ;
- les politiques misant davantage sur la substitution que sur l'accumulation en forêt visent des résultats autres que le carbone (innovation, activité industrielle, emploi, vitalité des territoires, balance commerciale) ;
- dans le débat plus général sur la politique énergétique (où les questions de disponibilité, intermittence, adéquation offre-demande et stockage comptent également beaucoup ; Syrota *et al.*, 2007), le bois peut être regardé comme de l'énergie solaire stockée, facilement mobilisable et donc flexible. Le fait de maintenir le stock de bois national à un niveau de densité intermédiaire (ni trop clair, ni trop capitalisé) permet de renforcer encore cette flexibilité, en permettant des modulations, à la hausse comme à la baisse ;
- les forêts rendent de nombreux services écosystémiques très appréciés par la société ; même si c'est peu apparent ni revendiqué par les acteurs, le fait que les forêts soient gérées contribue fortement à rendre certains de ces services effectivement disponibles, et à garantir une certaine stabilité dans leur fourniture, en particulier par temps de crise ; une meilleure explicitation de ces relations entre gestion et qualité des services aiderait sans doute à améliorer l'acceptabilité sociale des transformations de pratiques de gestion qui semblent aujourd'hui inéluctables (Millar *et al.*, 2007), dans le contexte du changement climatique.

¹⁷ Autres variables explicatives que le prix et l'évolution de la ressource et/ou pas les mêmes niveaux d'élasticités

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Armington P. S., 1969. A theory of demand for products distinguished by place of production. *IMF Staff papers*, 16(1):159. 176.
- Assmann E., 1970. *The principles of forest yield study*, Pergamon press, 503 p.
- Battisti A., Stastny M., Netherer S., Robinet C., Schopf A., Roques A., Larsson S., 2005. Expansion of geographic range in the pine processionary moth caused by increased winter temperatures. *Ecological Applications*, 15(6): 2084-2096.
- Bedia J., Herrera S., Camia A., Moreno J.M., Gutiérrez J.M., 2014. Forest fire danger projections in the Mediterranean using ENSEMBLES regional climate change scenarios. *Climatic Change*, 122: 185. 199
- Beeker, E., 2017. Transition énergétique allemande : la fin des ambitions ? *La note d'analyse - France Stratégie*, 59 : 11.
- Bellard C., Thuiller W., Leroy B., Genovesi P., Bakkenes M., Courchamp F., 2013. Will climate change promote future invasions? *Global Change Biology*, 19: 3740. 3748.
- Bergot M., Cloppet E., Pérarnaud V., Déqué M., Marçais B., Desprez-Loustau M.L., 2004. Simulation of potential range expansion of oak disease caused by *Phytophthora cinnamomi* under climate change. *Global Change Biology*, 10: 1539-1552
- Bihoux P., 2014. *L'âge des low tech - Vers une civilisation techniquement soutenable*. Paris : Seuil, 330 p.
- Bontemps J.D., 2017. L'état surprenant des forêts françaises. *Émission radiophonique animée par Fabienne Chauvière, France Inter, dimanche 4 juin 2017 (53 minutes)*.
- Box G.E.P., Draper N.R., 1987. *Empirical Model-Building and Response Surfaces*. Wiley, 424 p.
- Bradford J.B., Jensen N.R., Domke G.M., Damato A.W., 2013. Potential increases in natural disturbance rates could offset forest management impacts on ecosystem carbon stocks. *Forest Ecology and Management* 308: 178. 187. doi:10.1016/j.foreco.2013.07.042
- Bréda N., Huc R., Granier A., Dreyer E., 2006. Temperate forest trees and stands under severe drought: a review of ecophysiological responses, adaptation processes and long-term consequences. *Annals of Forest Science* 63: 625. 644.
- Chatry C., Le Gallou J.-Y., Le Quentrec M., Lafitte J.-J., Laurens D., Creuchet B., 2010. *Changement climatique et extension des zones sensibles aux feux de forêts*. Rapport de la mission interministérielle, 190p.
- CITEPA, 2017. *Rapport CCNUCC. Inventaire des émissions de GES en France entre 1990 et 2015*. Paris : CITEPA, 631 p.
- Colin, A. 2014. *Emissions et absorptions de gaz à effet de serre liées au secteur forestier et au développement de la biomasse énergie en France aux horizons 2020 et 2030 - Tâches C et D. Contribution de l'IGN aux projections du puits de CO₂ dans la biomasse des forêts gérées de France métropolitaine en 2020 et 2030, selon différents scénarios d'offre de bois* (Rapport final, mars 2014 Convention MEDDE.DGEC/IGN n°2200682886). IGN, Nancy (France), 55 p.
- Dangerman A.T.C.J., Schellnhuber H.J., 2013. Energy systems transformation. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 110: E549. E558. doi:10.1073/pnas.1219791110.
- De Menthière N. (coord.), Lacroix D. (coord.), Schmitt B. (coord.), Béthinger A., David B., Didier C., Laurent L., Parent du Châtelet J., Pélegrin F., Hénaut P., Le Gall M., Pépin M.-H., Pradaud I., 2016. *Visions du futur et environnement : Les grandes familles de scénarios issues d'une analyse de perspectives internationales relatives à l'environnement*. Rapport du GT Prospective au Conseil d'AllEnvi, volume 1 : rapport final de l'étude ScénEnvi, 73 p. ; volume 2 : recueil des fiches prospectives, 279 p.
- Desprez-Loustau M.L., Courtecuisse R., Robin C., Husson C., Moreau P.A., Blancard D., Selosse M.A., Lung-Escarmant B., Piou D., Sache I., 2010. Species diversity and drivers of spread of alien fungi (sensulato) in Europe with a particular focus on France. *Biol Invasions* 12:157. 172.
- Desprez-Loustau M.L., Marçais B., Nageleisen L.M., Piou D., Vannini A., 2006. Interactive effects of drought and pathogens on forest trees. *Annals of Forest Science*, 63: 597. 612.

- Dhôte J.-F., Leban J.-M., Saint-André L., Derrien D., Zhun M., Loustau D., Achat D., Roux A., Schmitt B., 2016. *Levier forestiers en termes d'atténuation pour lutter contre le changement climatique*. Rapport d'étude pour le Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la forêt, Paris : INRA-DEPE, 95 p.
- Dignac, M.-F., Derrien, D., Barré, P., Barot, S., Cécillon, L., Chenu, C., Chevallier, T., Freschet, G.T., Garnier, P., Guenet, B., Hedde, M., Klumpp, K., Lashermes, G., Maron, P.-A., Nunan, N., Roumet, C., Basile-Doelsch, I., 2017. Increasing soil carbon storage: mechanisms, effects of agricultural practices and proxies. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 37. doi:10.1007/s13593-017-0421-2
- Dittrich, M., Bringezu, S., Schütz, H., 2012. The physical dimension of international trade, part 2: Indirect global resource flows between 1962 and 2005. *Ecological Economics* 79: 32-43. doi:10.1016/j.ecolecon.2012.04.014
- Dupouey J.L., Dambrine E., Laffite J.-D., Moares C., 2002. Irreversible impact of past land use on forest soils and biodiversity. *Ecology*, 83: 2978-2984.
- Eriksson E., Gillespie A.R., Gustavsson L., Langvall O., Olsson M., Sathre R., Stendahl J., 2007. Integrated carbon analysis of forest management practices and wood substitution. *Canadian Journal of Forest Research* 37: 671-681. doi:10.1139/X06-257.
- Eriksson L.O., Gustavsson L., Hänninen R., Kallio M., Lyhykäinen H., Pingoud K., Pohjola J., Sathre R., Solberg B., Svanaes J., Valsta L., 2012. Climate change mitigation through increased wood use in the European construction sector: towards an integrated modelling framework. *European Journal of Forest Research* 131: 131-144. doi:10.1007/s10342-010-0463-3.
- Fabre B., Piou D., Desprez-Loustau M.L. and Marçais B., 2011. Can the emergence of pine Sphaeropsis shoot blight in France be explained by changes in pathogen pressure linked to climate change? *Global Change Biology*, 17: 3218-3222
- FCBA, 2008. *Carbone stocké dans les produits bois - Conception d'une méthodologie de quantification des variations de stock dans les produits du bois répondant aux exigences du GIEC et application à l'année 2005 pour un rapportage volontaire dans le cadre de la Convention Cadre des Nations Unies sur le Changement Climatique*. Rapport final de la Convention FCBA-MAP n°G13-2007, FCBA, Paris, 87 p.
- FCBA, 2012. *Carbone Forêt-Bois : des faits et des chiffres*. Document interne, mai 2012, 27 p.
- FCBA, 2016. *Memento 2016*. 46 p.
- Fortin M., Ningre F., Robert N., Mothe F., 2012. Quantifying the impact of forest management on the carbon balance of the forest-wood product chain: A case study applied to even-aged oak stands in France. *Forest Ecology and Management*, 279: 176-188
- Fisher MC, Henk AD, Briggs CJ, Brownstein JS, Madoff LC, McCraw SH, Gurr SJ. 2012. Emerging fungal threats to animal, plants and ecosystems. *Nature*, 484: 186-194
- Galik C.S., Jackson R.B., 2009. Risks to forest carbon offset projects in a changing climate. *Forest Ecology and Management* 257: 2209-2216. doi:10.1016/j.foreco.2009.03.017
- Gauquelin X., 2010. *Guide de gestion des forêts en crise sanitaire*. Institut pour le Développement Forestier, Paris. 97 p.
- Goudet M., 2017. *Réseau systématique de suivi des dommages forestiers. Bilan 2016*. Département de la Santé des Forêts, 10 p.
- Grassi G., House J., Dentener F., Federici S., den Elzen M., Penman J., 2017. The key role of forests in meeting climate targets requires science for credible mitigation. *Nature Climate Change* 7: 220-226. doi:10.1038/nclimate322.
- Guehl J.M., Alexandre S., Peyron J.L., 2016. *Changement climatique et forêts*. Comm. Acad. Agriculture de France, 20 janvier 2016. 10 p.
- Hedenus F., Azar C., 2009. Bioenergy plantations or long-term carbon sinks? . A model based analysis. *Biomass and Bioenergy* 33: 1693-1702. doi:10.1016/j.biombioe.2009.09.003.
- Hervé J.C., Bontemps J.D., Leban J.M., Saint-André L., Véga C., 2016. Évaluation des ressources forestières pour la bioéconomie: quels nouveaux besoins et comment y répondre ? *Comm. au Carrefour de la recherche agronomique « Une bioéconomie basée sur le bois »*, Nancy (France), 8 déc. 2016, 28 diapos.

- Houllier F., 1991. *Analyse et modélisation de la dynamique des peuplements forestiers : application à la gestion des ressources forestières*. Mémoire pour l'obtention de l'habilitation à Diriger les Recherches, Univ. Claude Bernard . Lyon1, 75 p.
- IGN, 2016. *La forêt en chiffres et en cartes (memento 2016)*. 17 p.
- Jactel H., Petit J., Desprez-Loustau M.L., Delzon S., Piou D., Battisti A., Koricheva J., 2012. Drought effects on damage by forest insects and pathogens: a meta-analysis. *Global Change Biology* 18: 267. 276.
- Jonard M., Nicolas M., Coomes D.A., Caignet I., Saenger A., Ponette Q., 2017. Forest soils in France are sequestering substantial amounts of carbon. *Science of The Total Environment* 574: 616. 628. doi:10.1016/j.scitotenv.2016.09.028.
- Katers, J.F., Snippen, A.J., Puettmann, M.E., 2012. Life-cycle inventory of wood pellet manufacturing and utilization in Wisconsin. *Forest Products Journal* 62: 289. 295.
- Kurz W. A., Dymond C. C., Stinson G., Rampley G. J., Neilson E. T., Carroll A. L., Ebata T., Safranyik L., 2008. Mountain pine beetle and forest carbon feedback to climate change. *Nature*, 452(7190): 987-990.
- Landmann G., Berger F., 2015. La forêt protectrice face au changement climatique. In : *L'arbre et la forêt à l'épreuve d'un climat qui change*. Observatoire national sur les effets du réchauffement climatique. Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie. Rapport au Premier ministre et au Parlement. Paris, La documentation française, pp. 65-75.
- Langsæter A., 1941. Om tynning i enaldret gran- og furuskog. *Medd. Det Norske Skogsforsøgsvesen*, VIII, p.131-216.
- Legay J.M., 1986. *Diversification des modèles de développement rural : questions et méthodes*. Colloque Méthodes et modèles dans l'étude des systèmes complexes. National du Ministère de la Recherche et de la Technologie, Paris, 17-18 avril 1986. 10 p.
- Legay J.M., 1973. La méthode des modèles, état actuel de la méthode expérimentale. *Informatique et biosphère*, Paris. 7-71.
- Lindner M., Maroschek M., Netherer S., Kremer A. Barbati A., Garcia-Gonzalo J., Seidl R., Delzon S., Corona P., Kolström M., Lexer M.J., Marchetti M., 2010. Climate change impacts, adaptive capacity, and vulnerability of European forest ecosystems. *Forest Ecology and Management*, 259: 698. 709.
- Lippke B., 2009. *Maximizing Forest Contributions to Carbon Mitigation*. The science of life cycle analysis . a summary of CORRIM research findings, CORRIM Fact Sheet n°5.
- Lobianco, A., Delacote P., Cauria S., Barkaoui, A., 2016. Accounting for active management and risk attitude in forest sector models. An impact study on French forests. *Environmental Modeling and Assessment*, 21(3): 391-405.
- Lundmark T., Bergh J., Hofer P., Lundström A., Nordin A., Poudel B., Sathre R., Taverna R., Werner F., 2014. Potential Roles of Swedish Forestry in the Context of Climate Change Mitigation. *Forests* 5: 557. 578. doi:10.3390/f5040557.
- Madignier M.-L., Benoit G., Roy C. (coord.), 2014. *Les contributions possibles de l'agriculture et de la forêt à la lutte contre le changement climatique*. Rapport CGAAER, Paris.
- Mathijs E., Brunori G., Carus M., Griffon M., Last L., Gill M., Koljonen T., Lehoczky E., Olesen I., Potthast A., 2015. *Sustainable Agriculture, Forestry and Fisheries in the Bioeconomy - A Challenge for Europe (Stand Committee on Agricultural Research - 4th Foresight Exercise)*. Commission Européenne, Bruxelles, 153 p.
- Marçais B., Bréda N. 2006. Role of an opportunistic pathogen in the decline of stressed oak trees. *Journal of Ecology*, 94: 1214. 1223.
- Meersmans J., Arrouays D., van Rompaey A.J.J., Pagé C., De Baets S., Quine T.A., 2016. *Future C loss in mid-latitude mineral soils: climate change exceeds land use mitigation potential in France*. Scientific Reports 6. <http://www.nature.com/articles/srep35798>
- Merkle S., Cunningham M., 2011. Southern Hardwood Varietal Forestry: A New Approach to Short-Rotation Woody Crops for Biomass Energy. *Journal of Forestry* 109: 7. 14.
- Millar C.I., Stephenson N.L., Stephens S.L., 2007. Climate change and forests of the future: managing in the face of uncertainty. *Ecological applications* 17: 2145. 2151.

- Nabuurs G.-J., Delacote P., Ellison D., Hanewinkel M., Lindner M., Nesbit M., Ollikainen M., Savaresi A., 2015. *A new role for forests and the forest sector in the EU post-2020 climate targets, From Science to Policy* / European Forest Institute. EFI, Joensuu, 32p.
- Nijnik M., Pajot G., Moffat A.J., Slee B., 2013. An economic analysis of the establishment of forest plantations in the United Kingdom to mitigate climatic change. *Forest Policy and Economics* 26: 34-42. doi:10.1016/j.forpol.2012.10.002.
- Oliver C.D., Nedal N., Lippke B., McCarter J., 2014. Carbon, Fossil Fuel, and Biodiversity Mitigation with Wood and Forests, *Journal of sustainable Forestry*, 33(3): 248-275.
- Oudin A., 1930. Vue d'ensemble sur l'organisation en France des recherches de sylviculture et de l'économie forestière. *Ann. Ecole Nle Supérieure des Eaux & Forêts et de la Station de Rech. & Expér. Forestières*, 3(2): 227-267.
- Pausas, J.G., 2004. Changes in fire and climate in the eastern Iberian Peninsula (Mediterranean basin). *Climatic Change*, 63: 337-350.
- Petersen A.K., Solberg B., 2005. Environmental and economic impacts of substitution between wood products and alternative materials: a review of micro-level analyses from Norway and Sweden. *Forest Policy and Economics* 7: 249-259. doi:10.1016/S1389-9341(03)00063-7.
- Pingoud K., Pohjola J., Valsta L., 2010. Assessing the Integrated Climatic Impacts of Forestry and Wood Products. *Silva Fennica* 44: 155-175.
- Pineau X., David G., Peter Z., Sallé A., Baude M., Lieutier F., Jactel H., 2017. Effect of temperature on the reproductive success, developmental rate and brood characteristics of *Ips sexdentatus*. *Agricultural and Forest Entomology*, 19: 23-33.
- Piñol J., Terradas J., Lloret F., 1998. Climate warming, wildfire hazard, and wildfire occurrence in coastal eastern Spain. *Climatic Change*, 38: 345-357.
- Rautiainen A., Saikku L., Kauppi P.E., 2010. Carbon gains and recovery from degradation of forest biomass in European Union during 1990-2005. *Forest Ecology and Management* 259: 1232-1238.
- Robinet C., Laparie M., Rousselet J., 2015. Looking Beyond the Large Scale Effects of Global Change: Local Phenologies Can Result in Critical Heterogeneity in the Pine processionary Moth. *Frontiers in Physiology*, 6(334).
- Robinet C., Kehlenbeck H., Kriticos D.J., Baker R.H.A., Battisti A., Brunel S., et al., 2012. A Suite of Models to Support the Quantitative Assessment of Spread in Pest Risk Analysis. *PLoS ONE* 7(10): e43366. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0043366>.
- Roques A., Kenis M., Lees D., Lopez-Vaamonde C., Rabitsch W., Rasplus J.Y., Roy D., 2010. Alien terrestrial arthropods of Europe. *BIORISK - Biodiversity and Ecosystem Risk Assessment*, 4 (Special Issue), 1038 p.
- Roy C., 2006. Valorisation de la biomasse forestière : enjeux et priorités. *Revue Forestière Française* 58 : 413-418.
- Ruter S., Werner F., Forsell N., Prins C., Vial E., Levet A.L., 2016. *ClimWood2030, Climate benefits of material substitution by forest biomass and harvested wood products: Perspective 2030*. Final Report. Braunschweig: Johann Heinrich von Thünen-Institut, 142 p.
- Santini A., Ghelardini L., De Pace C., Desprez-Loustau M.L., Capretti P., Chandelier A., et al., 2013. Biogeographical patterns and determinants of invasion by forest pathogens in Europe. *New Phytologist* 197: 238-250. doi: 10.1111/j.1469-8137.2012.04364.x PMID: 23057437.
- Sauquet A., Lecocq F., Delacote P., Caurla S., Barkaoui A., Garcia, S., 2011. Estimating Armington elasticities for sawnwood and application to the French Forest Sector Model. *Resource and Energy Economics*, 33:771-781.
- Sathre R., O'Connor J., 2010. Meta-analysis of greenhouse gas displacement factors of wood product substitution. *Environmental Science & Policy*, 13 (2): 104-114.
- Sathre R., O'Connor J., 2010. *A synthesis of research on wood products and greenhouse gas impacts*. 2nd edition. Technical report n° TR-19R, FPIInnovation, 123 pages.
- Schwarzbauer P., Stern T., 2010. Energy vs. material: Economic impacts of a wood-for-energy scenario+ on the forest-based sector in Austria - A simulation approach. *Forest Policy and Economics* 12: 31-38. doi:10.1016/j.forpol.2009.09.004.

- Sebillotte M., Cristofini B., Lacaze J.-F., Messéan D., Normandin D., 1998. Prospective : la forêt, sa filière et leurs liens au territoire. Tome 1. *Synthèse et scénarios. Répercussions pour la recherche* (257 p.). Tome 2. *Rapport des ateliers* (130 p.).
- Sedjo R.A., Sohngen B., 2013. Wood as a Major Feedstock for Biofuel Production in the United States: Impacts on Forests and International Trade. *Journal of Sustainable Forestry* 32: 195-211. doi:10.1080/10549811.2011.652049.
- Seidl R., Schelhaas M.-J., Rammer W., Verkerk P.J., 2014. Increasing forest disturbances in Europe and their impact on carbon storage. *Nature Climate Change* 4 : 806.
- Syrota J., Bergougnoux J., Tuot T., Hirtzman P., 2007. *Perspectives énergétiques de la France à l'horizon 2020-2050*. Rapport de synthèse, Centre d'analyse stratégique - Rapports et documents. Centre d'analyse stratégique, Paris.
- Thürig E., Kaufmann E., 2010. Increasing carbon sinks through forest management: a model-based comparison for Switzerland with its Eastern Plateau and Eastern Alps. *European Journal of Forest Research* 129: 563-572. doi:10.1007/s10342-010-0354-7.
- Werner F., Taverna R., Hofer P., Thürig E., Kaufmann E., 2010. National and global greenhouse gas dynamics of different forest management and wood use scenarios: a model-based assessment. *Environmental Science & Policy* 13: 72-85.
- Wernsdörfer H., Colin A., Bontemps J.-D., Chevalier H., Pignard G., Cauria S., Leban J.-M., Hervé J.-C., Fournier M., 2012. Large-scale dynamics of a heterogeneous forest resource are driven jointly by geographically varying growth conditions, tree species composition and stand structure. *Annals of Forest Science* 69: 829-844.
- Zell J., Kändler G., Hanewinkel M., 2009. Predicting constant decay rates of coarse woody debris - A meta-analysis approach with a mixed model. *Ecological Modelling* 220: 904-912. doi:10.1016/j.ecolmodel.2009.01.020.



INRA

SCIENCE & IMPACT

Délégation à l'Expertise Scientifique, à la Prospective et aux Etudes

147, rue de l'Université
75338 Paris Cedex 07
France

Tél. : + 33 1 42 75 94 90
Fax : + 33 1 42 75 91 72
www.inra.fr

