GESTION FORESTIÈRE ET CHANGEMENT CLIMATIQUE

UNE NOUVELLE APPROCHE DE LA STRATÉGIE NATIONALE D'ATTÉNUATION

Gaëtan du Bus de Warnaffe
Sylvain Angerand

Janvier 2020

Gestion Forestière et Changement Climatique

Une nouvelle approche de la stratégie nationale d'atténuation

Gaëtan du Bus de Warnaffe
Sylvain Angerand

Janvier 2020

Cette étude a été réalisée dans le cadre d'un partenariat entre la fédération des Amis de la Terre France, Canopée et Fern grâce au soutien financier de l'European Climate Foundation, de la David and Lucile Packard Foundation, de la Fondation Nature et Découvertes, et du Programme Life de l'Union européenne.

Crédit photo couverture : Bernard Débarque

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUME 5

1. CONTEXTE ET OBJECTIFS 7

2. REVUE DE LITTÉRATURE 8

Introduction 8

2.1. Cycle du carbone et stockage dans les écosystèmes forestiers 8

2.2. Stockage de carbone dans les produits bois 10

2.3. Effets de substitution 10

2.4. Conséquence des choix de gestion forestière sur la contribution de la filière forêt-bois à la lutte contre les changements climatiques 12

2.4.1. Part de forêts et d'arbres laissés en libre évolution 12

2.4.2. Coupes, niveau de volume sur pied et termes d'exploitabilité 13

1) Nature de la coupe (sélective ou totale) : *13*

2) Intensité et périodicité en cas de coupe sélective : *14*

3) Terme d'exploitabilité choisi : *14*

4) Devenir des branches et des souches : *15*

2.4.3. Essences favorisées ou plantées 15

2.4.4. Modalités de renouvellement, travail du sol et amendements 16

2.4.5. Aspects sanitaires 16

2.4.6. Incendies et tempêtes 17

2.4.7. Facteurs biophysiques 17

2.4.8. Produits réalisés et émissions générées par la mobilisation du bois 17

2.5. Les stratégies d'atténuation actuelles 17

3. PROPOSITION STRATÉGIQUE 21

3.1. Introduction 21

3.2. Un préalable : analyser les limites à l'augmentation des prélèvements 22

3.2.1. Surfaces gérées, production et prélèvements actuels 22

3.2.2. Obstacles à la mobilisation du bois 23

1) Exploitabilité *23*

2) Verrous fonciers .....

3.4. Axe 2 : Préserver et augmenter les stocks dans les produits-bois 30
3.5. Axe 3 : Substituer par le bois et réduire les émissions de la filière 30
3.6. Les scénarios 2020-2050 étudiés 31
3.6.1. Base commune 31
Libre évolution (LE) *32*
Sylviculture continue (SC) *32*
Impasses (Imp) *35*
3.6.2. Niveaux de prélèvements 35
3.6.3. Taux de mortalité 37
3.6.4. Evolution des surfaces par situation de gestion 39

4. METHODOLOGIE DE CALCUL 40
4.1. Contexte, périmètre et données de base 40
4.2. Calcul de l'évolution des stocks entre 2020 et 2050 41
4.2.1. Principes de base 41
4.2.2. Biomasse vivante 42
4.2.3. Biomasse morte et pertes d'exploitation 43
4.2.4. Carbone du sol 44
4.2.5. Récoltes 45
4.2.6. Stock de produits-bois 45
4.2.7. Substitution et émissions de la filière 46
4.2.8. Facteurs de conversion 47
4.2.9. Résumé des paramètres retenus 47

5. RESULTATS ET DISCUSSION 49
5.1. Evolution du taux de prélèvement bois fort tige 49
5.2. Evolution des stocks 51
Bilan Variations de stocks et gain par substitution entre 2020 et 2050 55
5.3. Quantité et qualité du bois mort 56
5.4. Evolution du puits 57
5.5. Analyse détaillée du scénario R60-M1 (compromis) 60
5.5.1. Evolution des stocks par situation de gestion 60
5.5.2. Distribution spatiale des prélèvements 63
5.5.3. Récoltes et stocks de produits générés 64
5.5.4. Arbitrages sur les usages du BIBE 64
5.6. Perspective 2050-2100 65
5.7. Synthèse des déterminants du puits 68
5.8. Comparaison avec d'autres scénarios 69

6. CONCLUSION DE L'ETUDE 71

7. BIBLIOGRAPHIE 73

RÉSUME

Par cette étude, nous avons tenté de faire état des connaissances sur le puits de carbone que constitue la forêt et la filière-bois, pour proposer et analyser une stratégie visant à optimiser le rôle de la gestion forestière dans l'atténuation du changement climatique à l'horizon 2050.

Le rôle climatique de la forêt et de sa gestion touche des champs scientifiques larges et complexes. Sans pouvoir être exhaustive, l'étude bibliographique montre une littérature assez riche et intéressante. Les stratégies actuelles proposées sont parfois contradictoires et de vifs débats ont lieu, en particulier sur les taux de prélèvement et la place accordée à la substitution par le bois des énergies et matériaux non renouvelables. Cette analyse montre que pour stocker du carbone, on devra (1) préserver et si possible augmenter les stocks aériens et sous-terrain par une sylviculture adaptée, (2) préserver et augmenter les stocks dans les produits-bois, (3) substituer le bois aux matériaux concurrents en limitant les émissions générées par la filière-bois.

Nous étudions ensuite la marge maximale d'augmentation des prélèvements. La production nette totale de bois en forêt française est estimée à 120 Mm^3/an et le taux de prélèvement total à 50%. Compte-tenu des limites physiques et des verrous fonciers et sociaux, la surface maximale pouvant faire l'objet de prélèvements est évaluée à 78% de la forêt française soit 12,6 Mha. En prélevant en tout 95 Mm^3 par an, on récolterait toute la production nette sur cette surface. Ce potentiel maximal de prélèvements ne pourrait être atteint qu'après des efforts conséquents d'équipement et de regroupement foncier, il suppose une mortalité constante et implique une exploitation quasi-totale des branches et des arbres morts, qui ne serait pas sans conséquences pour la biodiversité et la fertilité des sols. Cette hypothèse est approfondie dans le rapport.

Pour construire une stratégie d'atténuation et en étudier les effets potentiels, nous identifions d'abord trois situations de gestion type en France métropolitaine (libre évolution, impasses, sylviculture continue). La sylviculture continue est définie précisément, de même que les situations d'impasse qui nécessitent un reboisement par plantation avec changement d'essences. Un niveau de volume sur pied optimal (à l'équilibre) est estimé. Ensuite trois scénarios de prélèvement sont définis à partir d'objectifs très différents (priorité filière, priorité écosystème, compromis), ceci en surface constante (16 Mha) et dans deux scénarios d'évolution de la mortalité annuelle que l'on peut relier aux perspectives climatiques optimistes et pessimistes du GIEC. Dans ces scénarios, la surface non gérée concerne 35% de la forêt en 2020 et 25% en 2050 dont 10% en libre évolution sous statut légal, tandis que la surface en impasse (à raser/replanter) représente 3% de la forêt française en 2020 et 4 à 7% en 2050 selon le niveau de mortalité, le reste étant géré en sylviculture continue. Les taux de récolte de branches et du bois mort varient de 10% (priorité écosystème) à 75% (priorité filière).

Les trois scénarios étudiés mènent en 2050 à des récoltes totales allant de 30 à 95 Mm^3/an, résultant d'évolutions contrastées des taux de prélèvement tige, branches et bois mort. A l'évidence, le scénario « extensif » optimise l'évolution des stocks dans l'écosystème, tandis que le scénario « intensif » optimise l'évolution des stocks dans les produits-bois. Toutefois, à partir d'un même état initial, le stock total (écosystème + produits) en 2050 est d'autant plus fort que le prélèvement est bas. Le puits annuel de carbone diminue continuellement dans le scénario d'augmentation des prélèvements, tandis qu'il monte avec le scénario de faibles prélèvements. Même en considérant les effets de substitution, le scénario de prélèvement intensif ne donne pas d'avantage climatique. Ces fortes variations de stock auront des conséquences sur la biodiversité, mais aussi sur la fertilité des sols et l'état sanitaire des arbres, donc sur la capacité des écosystèmes à continuer de produire du bois sans devenir dépendants d'intrants coûteux et énergivores.

Au-delà des questions de durabilité écologique, augmenter les prélèvements jusque 95 Mm^3/an en 2050 imposerait des mesures autoritaires de mobilisation des surfaces et des volumes sur pied. Inversement, baisser

les prélèvements comme dans le scénario extensif pourrait créer une crise d'approvisionnement dans la filière-bois, accentuant les fermetures de scieries, les problèmes d'emploi en zone rurale et entrainant la hausse des imports. Le scénario de maintien des prélèvements actuels parait donc un compromis intéressant, pour autant que les prélèvements soient mieux répartis qu'aujourd'hui.

Nous proposons d'approfondir une stratégie d'atténuation, fondée sur (1) le choix explicite de maintenir durablement 25% de la surface forestière en libre évolution ; (2) le maintien jusque 2050 d'un prélèvement de 60 Mm^3/an avec augmentation des surfaces gérées pour mieux répartir ce prélèvement dans l'espace, atteindre un capital d'équilibre et diminuer le taux de prélèvement des branches et du bois mort ; (3) la pratique d'une sylviculture à couvert continu avec des termes d'exploitabilité élevés, combinée dans les surfaces en impasse, à la futaie régulière par petits parquets plantés d'essences diversifiées après un travail du sol minimal.

En proposant une hausse des prélèvements jusque 95 Mm^3 d'ici 2050, les stratégies nationales actuelles (SNBC, PNFB, Afterre) ne détaillent pas l'effet de ce choix sur les stress subis par les arbres, les stocks de biomasse dans l'écosystème, la fertilité du sol sous l'effet du prélèvement des branches, la biodiversité sous l'effet du prélèvement des bois morts et de la raréfaction des gros et très gros bois, les conflits d'usage. Une telle optique peut mener à une déstabilisation des écosystèmes imposant progressivement la pratique des cycles courts et le renouvellement par plantation.

Toute stratégie à l'échelle nationale devrait être confrontée aux stratégies construites à l'échelle régionale avec les acteurs locaux, afin de tester son réalisme et d'imaginer plus concrètement la distribution des prélèvements dans l'espace. La littérature, les scénarios développés et l'outil de calcul de cette étude pourrait permettre un dialogue à partir de simulations régionales.

Le sujet traité est très complexe et notre étude n'a pas vocation à répondre aux interrogations fortes que pose aujourd'hui l'évolution climatique et le rôle à jouer par la forêt et les produits bois. Elle apporte cependant un regard nouveau sur le sujet, partage les savoirs et ouvre la discussion à un public large, afin que l'avenir de la forêt française ne soit pas décidé par les seuls experts et politiques dont la parole est jugée recevable.

Auteurs et remerciements

Gaëtan du Bus de Warnaffe est ingénieur forestier et docteur en sciences agronomiques, qualifié maitre de conférences en écologie des populations et des communautés, expert forestier et gestionnaire de forêts en Occitanie. Sylvain Angerand est ingénieur forestier.

Nous remercions les personnes suivantes pour leur lecture et leurs remarques pertinentes sur ce rapport : Daniel Vallauri, Catherine Molière, Philippe Leturcq, Xavier Morin, Valentin Bellassen, Baptiste Hautdidier, Hervé Le Bouler, Kelsey Perlman.

1. CONTEXTE ET OBJECTIFS

La température moyenne du globe a augmenté d'environ 1°C depuis l'ère préindustrielle. Plusieurs études montrent qu'au-delà d'un réchauffement de +1,5°C, le risque est important de franchir un point de bascule climatique (« tipping points ») qui pourrait entrainer un emballement des changements climatiques (Moore, 2018). S'il est très difficile d'identifier avec précision quand ce point de bascule pourrait être franchi, il est certain que les prochaines décennies seront cruciales (GIEC, 2018).

Le dernier rapport du GIEC (2018) sur les scenarios permettant de limiter le réchauffement climatique à +1,5°C par rapport au niveau préindustriel appelle à des changements rapides, profonds et sans précédent dans tous les aspects de l'organisation de nos sociétés. Ce rapport estime que l'atmosphère ne peut absorber plus de 420 gigatonnes (Gt) de CO_2 pour tenter de rester sous ce seuil de température. Chaque année, l'Humanité émet environ 42 Gt de CO_2 à l'échelle globale, ce qui signifie qu'au rythme actuel, cette limite pourrait être franchie dans 9 ans et qu'il reste 26 ans avant de dépasser celle permettant de limiter le réchauffement climatique à +2°C. Rester à cet objectif +2°C devrait être possible en atteignant « zéro émissions nettes » en 2050.

Les forêts sont essentielles pour absorber du dioxyde de carbone (GIEC, 2018) et maintenir l'élévation de la température moyenne mondiale en-dessous de 2°C, et aussi près que possible de 1,5°C (Accord de Paris en 2015). En France, les forêts représentent un puits de carbone actuellement estimé à -65 Mteq-CO_2/an (MTES, 2018a) avec des estimations jusque -87 Mteq-CO_2/an (Couturier 2018, EFESE, 2019), soit environ 20% des émissions de CO_2 en France. A court terme, renforcer leur protection pourrait être plus efficace que des programmes de boisements / reboisements (GIEC, 2019), qui peuvent avoir des bénéfices sur le moyen ou long terme mais également des risques pour la sécurité alimentaire et le développement soutenable (Searchinger et al 2018, GIEC 2019). Globalement, les écosystèmes terrestres absorbent aujourd'hui environ un tiers des émissions annuelles (GIEC, 2018) et les forêts sont responsables de la plus grande partie de ces absorptions.

Le débat sur la contribution de la filière forêt-bois s'est intensifié ces dernières années avec la publication de plusieurs études explorant des scénarios de gestion différents (Roux et al, 2017, Valade et al, 2017). Les orientations actuellement retenues par les pouvoirs publics s'appuient sur une augmentation des prélèvements en forêts (Plan National Forêt Bois, 2018) pour maximiser le stockage de carbone dans les produits bois et la substitution par des énergies ou produits jugés moins émetteurs (MTES, 2018a).

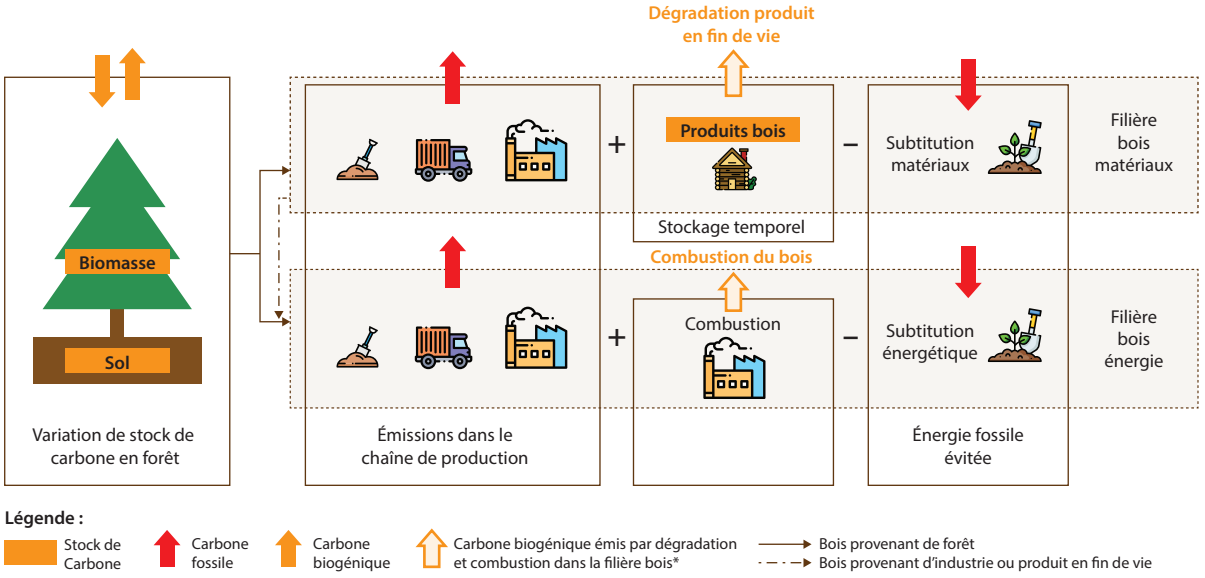
Ce rapport explore une autre option permettant d'augmenter la séquestration en forêt et le stockage dans des produits bois à longue durée de vie. Cette stratégie qualifiée de « proforestation » (Moomaw, 2019) consiste à augmenter la surface de forêt en libre-évolution et à allonger la durée des révolutions dans les forêts gérées, pour se rapprocher de l'optimum de stockage de carbone dans les écosystèmes. Elle présente le double avantage de maximiser l'absorption de dioxyde de carbone dans les prochaines décennies et d'augmenter significativement la naturalité des forêts, donc leur biodiversité. En explorant cette voie, la présente étude apporte un regard nouveau sur l'évolution des forêts françaises et leur contribution à l'atténuation du changement climatique.

Avant de construire toute proposition, nous analysons la littérature scientifique récente afin d'éviter toute incohérence avec les réalités aujourd'hui scientifiquement reconnues. Plus spécifiquement il s'agit de bien comprendre le cycle du carbone forestier et les facteurs naturels et anthropiques intervenant sur ce cycle du carbone, puis de prendre connaissance des stratégies actuellement proposées.

2. REVUE DE LITTÉRATURE

Introduction

On distingue classiquement quatre leviers pour optimiser le rôle de la filière forêt-bois dans l'atténuation du changement climatique : stockage dans l'écosystème, stockage dans les produits (séquestration), substitution sous forme de matériau, substitution sous forme d'énergie (Pingoud et al., 2010 ; Werner et al., 2010 ; Madignier et al., 2014 ; MTES 2018a). L'Ademe (2015) lie ces leviers dans le diagramme ci-dessous.



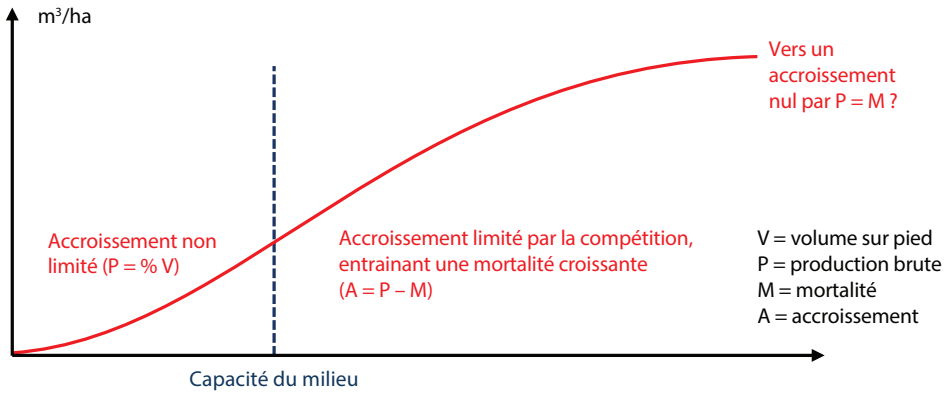
* si la récolte du bois est comptabilisée dans la variation de stock de carbone dans les écosystèmes, alors les émissions de CO_2 liées aux processus de dégradation ou de combustion du bois dans la filière ne doivent pas être comptabilisées afin de ne pas donner lieu à une double comptabilité.

Dans ce chapitre, nous détaillons la participation possible de ces différents leviers.

2.1. Cycle du carbone et stockage dans les écosystèmes forestiers

La forêt française joue le rôle d'un « puits de carbone », du fait d'une absorption de CO_2 par photosynthèse dépassant les émissions liées à la respiration. Entre les organismes vivants, le sol, les produits-bois extraits de la forêt et l'atmosphère, le carbone connait une « rotation » plus ou moins rapide sous l'effet de la dynamique de stockage et décomposition. Ainsi la rapidité de stockage et le niveau des stocks de carbone sont sous l'influence du climat, du sol, des végétaux en place et des interventions humaines sur ceux-ci. On schématise ci-dessous l'évolution des volumes sur pied dans le temps dans une forêt sans intervention, depuis un espace non-boisé.

Ainsi plus une forêt est âgée, plus son stock de carbone est important. Pour les forêts tempérées, Pregitzer et Euskirchen (2004) estiment à 300 tC/ha le contenu carbone moyen de la biomasse vivante pour la classe d'âge 120-200 ans, pour un volume bois fort de l'ordre de 600 m^3/ha.

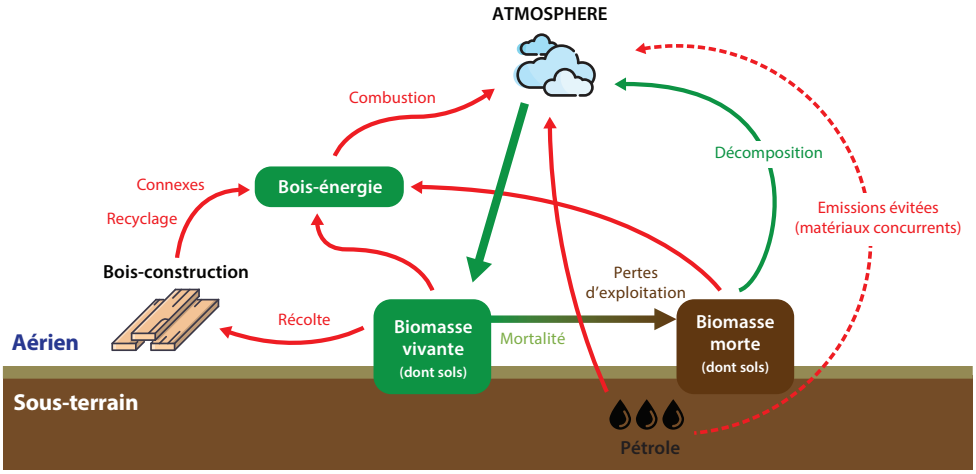


Il a longtemps été postulé qu'avec l'âge, un équilibre entre la respiration et la photosynthèse se mettait en place (Odum, 1969). Des travaux plus récents montrent toutefois que la capacité d'absorption des forêts anciennes et matures est sous-estimée, de sorte que cet équilibre arriverait de manière asymptotique et après des siècles voir des millénaires. Si le flux d'absorption de carbone diminue avec l'âge d'un arbre, des études montrent que les très gros sujets ont une productivité élevée (Stephenson et al., 2014) et qu'une forêt même très ancienne et mature continue à absorber du carbone de manière nette. Luyssaert et al. (2008) a ainsi montré en analysant des études réalisées sur 519 parcelles de forêts boréales et tempérées que : « *dans les forêts entre 15 et 800 ans, la production biologique nette est généralement positive et les forêts jouent donc un rôle de puits de carbone* ». À contrario, ils observent que les jeunes forêts sont souvent des sources d'émissions de CO_2, car leur installation est précédée d'une perturbation naturelle ou humaine du sol qui conduit à une décomposition de débris, de litières et de carbone organique, cette décomposition excédant pendant parfois plusieurs dizaines d'années la réabsorption de carbone par la croissance des jeunes arbres.

Le stockage net de carbone par les vieilles forêts est encore mal compris, mais pourrait s'expliquer par le stockage dans les sols d'une partie du carbone du bois mort. En étudiant les forêts de plus de 400 ans en réserve de biosphère de Dinghushan en Chine, Zhou et al., (2006) ont ainsi montré que les concentrations de carbone organique dans les 20 premiers centimètres du sol avaient continuellement augmenté entre 1979 et 2003, passant de 1,4% à 2,35%. On pourrait également supposer une hausse continue de la productivité par une efficacité globale croissante de l'utilisation des ressources (lumière, eau, minéraux) du fait de la maturité des arbres, de la complémentarité des niches et des relations entre individus et entre espèces (symbiose, coopération, commensalisme). Le poids respectif de ces effets par rapport à la mortalité est actuellement un des fronts de recherche en écologie forestière.

Pour comprendre les flux et stocks de carbone dans l'écosystème forestier, il faut donc considérer tous les compartiments dont celui du sol, qui au niveau mondial représenterait un stock 3 fois plus important que celui de l'atmosphère (EFESE, 2019).

Le diagramme ci-dessous résume le cycle du carbone dans le système forêt-bois-atmosphère.



2.2. Stockage de carbone dans les produits bois

Lorsque le bois des arbres est récolté puis transformé, une partie du carbone absorbé pendant la croissance est stocké dans les produits réalisés. La durée de stockage est définie par la durée de vie de ces produits, qui peut varier de quelques jours pour un prospectus, à plusieurs dizaines, voire centaines d'années pour un bâtiment en bois (EASAC, 2017). Toutefois, les pertes de transformation des filières menuiserie et construction sont généralement utilisés pour l'énergie et le papier, donc émettent rapidement du CO_2. Si le produit-bois constitue un stock de carbone, le bénéfice réel de l'exploitation d'un arbre dépend de la durée de vie du produit réalisé, qui doit être comparée à celle du bois dans l'écosystème si l'arbre n'avait pas été coupé.

Aujourd'hui les demi-vies moyennes retenues pour les produits (CNPF, 2017 et Commission Européenne) sont de 35 ans pour le bois d'œuvre, 25 ans pour les panneaux, 2 ans pour le papier et 1 an pour le bois-énergie. Depuis plusieurs décennies, la construction et l'ameublement font cependant usage de techniques tendant à réduire la durée de vie des produits-bois (charpentes en sciages de petites dimensions, agglomérés, panneaux).

2.3. Effets de substitution

Plusieurs auteurs proposent de prendre aussi en compte les effets de substitution qui résultent de l'usage de bois en remplacement d'énergies ou de matériaux concurrents présentant des bilans carbone moins favorables (Pingoud et al., 2010 ; Werner et al., 2010 ; Madignier et al., 2014 ; Vial, 2019). Cette intégration se fait au moyen de coefficients de substitution (CS) résultant, sur un temps donné, des cycles de vie du bois et des matériaux concurrents et de leurs impacts sur les autres compartiments carbonés (JRC, 2010).

L'effet bénéfique de l'usage du bois est cité depuis plus d'une décennie (Lippke, 2009) et prend en France une place majeure dans les scénarios d'atténuation (Roux et al., 2017 ; Solagro, 2016 ; Couturier, 2018). Cependant les coefficients de substitution sont marqués par une grande incertitude, du fait de la difficulté à prévoir les modes d'usage du bois et les usages de références (Roux et al., 2017 ; Vial 2019), mais aussi *à modéliser les cycles et* les émissions générées par la récolte et la transformation des matières premières.

L'effet de la substitution s'estime par un coefficient donnant un écart d'émissions carbone par unité de matériau mis en œuvre (Sathre & O'Connor, 2010) comme ci-dessous. Un CS positif signifie donc un effet climatique bénéfique de l'usage du bois. Ce point sera revu au chapitre 4.

Le **premier type d'effet de substitution est lié à l'utilisation de bois matériau**. De nombreuses études montrent que l'utilisation de matériaux à base de bois entraine généralement une baisse des émissions de gaz à effet de serre sur l'ensemble du cycle de vie en comparaison avec l'usage d'autres matériaux, dont la transformation nécessite davantage d'énergie grise. Toutefois, les coefficients attachés sont établis sur des bases purement statistiques (méta-analyses) et avec des hypothèses discutables. Ainsi le bénéfice climatique global de la récolte du bois matériau est contesté (Keith et al., 2015 ; Law et al., 2018), du moins avec les pratiques actuelles de la filière (Böttcher et al., 2018). Les chaines de transformation peuvent en effet être très différentes pour un même produit en bois, selon les modes d'exploitation, le transport et la transformation. De plus, les mutations en cours dans les filières concurrentes peuvent compliquer les comparaisons. La gamme de variation du coefficient de substitution bois matériau irait ainsi de 0,59 à 3,47 t-eqCO_2 par m^3 de bois utilisé (Rüter et al., 2016 ; Roux et al., 2017).

Le **deuxième type d'effet de substitution est lié à l'utilisation de bois énergie en remplacement d'énergies fossiles**. La substitution énergie est sans doute la notion la plus discutable et la plus complexe à appréhender. Certains auteurs proposent même de ne plus en tenir compte, car leurs effets sont estimés comme étant trop contradictoires dans la littérature (Böttcher et al., 2018). En effet, que l'on produise l'énergie à partir de bois ou d'un combustible fossile, la combustion déstocke du carbone et émet du CO_2. Le CO_2 émis par la combustion de biomasse est chimiquement identique à celle émis par une source fossile (Leturcq, 2011 ; Haberl, 2012) donc devrait être comptabilisé en émissions (Zanchi et al., 2012 ; Searchinger et al., 2018 ;

Smyth et al., 2014 ; Sterman et al., 2018). Le stock se reconstitue plus vite avec le bois, mais l'effet de la coupe ne sera nul que si le CO_2 émis est immédiatement recapté par un surcroit de photosynthèse entrainé par la récolte du bois. Or, l'exploitation forestière a sur la production un effet dépressif, temporaire en cas d'éclaircie et de plusieurs décennies en cas de coupe rase. La neutralité n'est donc pas immédiate et il faut prendre en compte la perte de séquestration de carbone que les arbres auraient pu continuer à réaliser s'ils n'avaient pas été coupés (Pelletier, 2018 ; Sterman et al., 2018). Ces variations de flux de carbone doivent être intégrées dans les coefficients de substitution (Valade et al., 2017), mais ce n'est généralement pas le cas. De plus, les coefficients supposent souvent la neutralité du commerce extérieur et n'intègrent pas les pertes d'exploitation (Roux et al., 2017).

Il est donc impossible de considérer que la combustion de bois-énergie est climatiquement « neutre » comme il est souvent affirmé en France (MTES, 2018a) et parfois au-delà (EU, 2003). Ce principe de neutralité est d'ailleurs en pleine contradiction avec les déclarations annuelles d'émissions françaises à l'Union Européenne, où 20% proviennent de la combustion du bois.

L'avantage de la substitution est évidemment nul voir négatif si la référence est une énergie non carbonée. En comparaison d'autres énergies carbonées, pour délivrer une même quantité de chaleur donnée le bois émet plus de CO_2 que le gaz ou le pétrole (Allemand, 2003). Ce bilan est alourdi si l'on considère les émissions indirectes liées à la récolte de bois énergie (Leturcq, 2014). En effet lorsque le bois est récolté en forêt, une partie de la récolte est abandonnée sur place (branches, feuillage, souche…) et entre donc dans un cycle de décomposition : une partie du carbone sera progressivement libérée dans l'atmosphère et une autre partie stockée dans les sols. En revanche, l'extraction des combustibles non-renouvelables émet plus de CO_2 que l'extraction du bois. Mais la prise en compte des émissions « amont » ne parvient pas à donner un avantage au bois selon Leturcq (2014) et Searchinger et al. (2018).

Ainsi, substituer une énergie par le bois ne sera bénéfique au climat que si les émissions liées à la chaine extraction-transport-transformation et l'impact de la coupe sur l'accroissement et les stocks du sol sont suffisamment faibles pour rendre l'analyse de cycle de vie du bois avantageuse par rapport à celle de l'énergie substituée. Elle ne sera bénéfique qu'au-delà d'un « temps de retour » du carbone dans l'écosystème (« dette carbone » ou « payback time ») déterminé par la capacité photosynthétique de l'écosystème, donc aussi les pratiques de gestion (Agostini et al., 2013 ; Ademe, 2015 ; Martel, 2019b). Ce temps étant long, l'usage du bois en énergie ne permettra peut-être pas d'éviter les seuils d'emballement climatique (EASAC, 2017 ; Booth, 2018 ; Schlesinger, 2018). En effet deux études récentes (Roux et al., 2017 ; Valade et al., 2018) montrent que la dette carbone contractée lors d'une augmentation de la récolte met au moins 35 ans pour être remboursée par la substitution. Ces études sont cohérentes avec les travaux du Joint Research Center, qui conclut également à des temps de remboursement de cette dette carbone allant de plusieurs décennies à plus d'un siècle selon le type de bois utilisé (Agostini et al., 2013). Le tableau ci-dessous résume les facteurs en jeu.

Source de biomasse pour l'énergie	Court terme (10 ans)		Moyen terme (50 ans)		Long terme (siècles)	
	charbon	gaz naturel	charbon	gaz naturel	charbon	gaz naturel
Récolte de gros bois de tige uniquement pour l'énergie en forêts tempérées	---	---	+/–	–	++	+
Récolte de résidu d'exploitation	+/–	+/–	+	+	++	++
Récolte après événements extrêmes	+/–	+/–	+	+	++	++
Travaux sylvicoles de prévention des incendies et maladies	+/–	+/–	+	+	++	++

Tableau 1. Évaluation du délai de temps de retour carbone si la récolte additionnelle de bois est destinée à un usage. Source : Centre de recherche de la Commission européenne (JRC), 2013

Légende: +/– : Les émissions nettes de GES du systeme bois énergie et fossile sont comparables
– : Le système bois énergie contribue plus à l'augmentation de la concentration de CO_2 atmosphérique que le système de référence fossile
+ : Le système bois énergie contribue moins à l'augmentation de la concentration de CO_2 atmosphérique que le système de référence fossile

Ainsi le Conseil scientifique des Académies des sciences européennes (EASAC, 2017) estime que : « *Les temps de retour carbone, potentiellement très longs pour la biomasse forestière, soulèvent d'importantes questions étant donné l'objectif de la Convention des Nations Unies sur le Climat de limiter le réchauffement climatique à +1,5°C par rapport au niveau pré-industriel. Avec les tendances actuelles, cet objectif pourrait être dépassé dans une dizaine d'années. S'appuyer sur la biomasse forestière comme source d'énergie renouvelable alors que cela conduit à une hausse initiale des émissions de dioxyde de carbone dans l'atmosphère, accroit le risque de dépasser cet objectif* ».

Ainsi l'avantage climatique du déstockage de la biomasse pour produire de l'énergie n'est aujourd'hui pas reconnu (Searchinger et al., 2018 ; Hennenberg et al., 2018 ; Collectif, 2018). De plus, l'augmentation des prélèvements pour l'énergie pourrait avoir des effets négatifs sur la fertilité des sols (Achat et al., 2015a-2015b) et sur la biodiversité (Bouget et al., 2012). Il existe ainsi de fortes tensions entre extraction de biomasse d'une part et fonctions environnementales des forêts (Bouget et al., 2012 ; EASAC, 2017). Le débat est encore intense sur les avantages de la substitution-énergie (Sterman et al., 2018 ; Prisley et al., 2018).

De manière générale, les coefficients de substitution sont marqués par une grande incertitude et leur usage questionne aussi les pratiques de gestion forestière et de valorisation des produits. Aux extrêmes, construire sur place en abattant et transformant un arbre sans moteur générera un coefficient de substitution très favorable, tandis que construire avec un arbre issu d'une chaine très mécanisée à l'autre bout de la France pourrait générer des émissions dépassant celles du matériau concurrent donc un coefficient négatif. Il est donc surprenant que les techniques de mobilisation, transformation et transport ne soient pas des variables de premier ordre dans les scénarios étudiés ; elles sont en quelques sorte masquées par l'usage de coefficients de substitution fixes et généralement peu justifi*és*. Enfin, ces coefficients supposent généralement la neutralité carbone et de la coupe et n'intègrent pas les pertes d'exploitation et la combustion des connexes liée au bois d'œuvre (Leturcq, 2014).

En résumé, toute substitution doit être analysée sous trois angles : (1) l'importance de la dette carbone générée par la coupe et l'effet de la coupe sur le stockage des écosystèmes, (2) la durée de vie des produits réalisés relativement à celle du bois laissé en forêt, (3) les émissions de carbone générées par les filières d'approvisionnement des matériaux concurrents.

2.4. Conséquence des choix de gestion forestière sur la contribution de la filière forêt-bois à la lutte contre les changements climatiques

La gestion des forêts peut influencer significativement leur rôle de puits de carbone. Selon EFESE (2019), une forte déstabilisation des écosystèmes terrestres français pourrait générer du CO_2 jusqu'à 60 fois les émissions annuelles françaises de 2015. Cette déstabilisation potentielle ne concerne les forêts que pour partie, mais des pratiques forestières brutales peuvent aussi entrainer d'importantes émissions. En revanche, comme expliqué plus haut, la filière-bois ajoute un compartiment de stockage lorsque les bois récoltés ont un usage durable.

On détaille ci-dessous les facteurs humains influençant les flux et stocks de carbone en forêt. Bien que près de la moitié de la forêt française soit issue du reboisement naturel ou humain depuis le milieu du XIX^{e} siècle, la surface de la forêt française est presque stable depuis 2010 et la transformation des terres agricoles en forêt devient rare ; nous écarterons le boisement des terres agricoles de l'étude bibliographique et des scénarios 2020-2050 étudiés.

2.4.1. Part de forêts et d'arbres laissés en libre évolution

Depuis plus de deux décennies, le prélèvement d'une grande partie de la production annuelle de biomasse des écosystèmes pour les activités humaines est identifié comme une menace majeure pour leur durabilité (Haberl et al., 1997, 2007 et 2014). Prélever 100% de la production biologique ne serait pas sans impact sur les écosystèmes forestiers (EFESE, 2019), en particulier concernant la biodiversité qui serait drastiquement impactée (Bouget et al., 2012), et ce faisant la fertilité des sols et la durabilité de la production primaire.

En dépit de ce que certains auteurs français supposent (CGAAER, 2008 ; Peyron, 2015 ; Roux et al., 2017), rien ne montre aujourd'hui que les forêts « naturelles » sont plus vulnérables aux évolutions climatiques que les

forêts plantées. La résilience des forêts naturelles face au changement climatique est montrée (Thompson et al., 2009) et la littérature abonde sur la meilleure résilience des peuplements mélangées en comparaison des peuplements monospécifiques (Morin et al., 2014 ; del Rio et al., 2017 ; Jactel et al., 2017 ; Jactel et al., 2018, van der Plas et al., 2018 ; Sousa-Silva et al., 2018 ; Jourdan et al., 2019). La prépondérance de monocultures, les prélèvements forts et les changements d'itinéraires sylvicoles favorisent l'effet des tempêtes et des agents biotiques (Nageleisen et al., 2010 ; Lousteau et al., 2010).

L'exploitation des forêts a en soi une influence directe sur les stocks de carbone, en agissant sur le niveau des stocks et sur le rôle tampon du bois mort (Roux et al., 2017). Ainsi la part de forêts non exploitées peut impacter le rôle de puits, d'autant plus que la forêt est jeune comme c'est globalement le cas pour la France. De nombreux auteurs ont montré que l'extension des réserves intégrales augmente le stockage de carbone (Berry & Mackey, 2008 ; Chazdon, 2014 ; Keith et al., 2015 ; Wilson, 2016, Böttcher, 2018 ; Lewis & Wheeler, 2019). Pour certains, diffuser l'idée que récolter du bois est toujours bon pour le climat maintient la gestion forestière comme stratégie d'atténuation dominante, tandis que la conservation a des effets climatiques et écosystémiques supérieurs (Keith et al., 2015). Quoiqu'il en soit la création de réserves intégrales bénéficie au stockage de carbone, comme en atteste l'intégration de cette mesure dans la Stratégie Nationale d'Adaptation au Changement Climatique (MTES, 2018b). Enfin, les écosystèmes variant dans leur productivité primaire et dans leurs stocks initial et potentiel selon l'essences, l'âge et la station (climat et sol), la nature des surfaces non exploitées peut être aussi déterminante.

2.4.2. Coupes, niveau de volume sur pied et termes d'exploitabilité

En France, 50% des arbres ont moins de 60 ans et 79% ont moins de 100 ans, avec des écarts assez forts entre essences (IFN, 2018). Cette jeunesse s'explique facilement par la pyramide naturelle de l'âge des arbres. En revanche seuls 1% des arbres ont plus de 200 ans, ce qui semble très peu au regard des forêts naturelles équivalentes.

La forêt française est globalement jeune (Roux et al., 2017) et gagne 27 Mm^3 par an, donc peut encore stocker du carbone et gagner en maturité (Hervé et al., 2016). Une simulation à climat constant montre une croissance des stocks quasi-linéaire jusque 2050 (Roux et al., 2017). La forêt française montre un volume bois fort tige par ha moyen de 170 m^3/ha, niveau faible au regard de la plupart des forêts européennes (FAO, 2010 ; FCBA, 2018) : on a par exemple 321 m^3/ha en Allemagne et 296 m^3/ha en Autriche, mais aussi 218 m^3/ha en Croatie et 360 m^3/ha en Slovénie, donc il est difficile d'expliquer le niveau français uniquement par nos 17% de forêt méditerranéenne naturellement moins capitalisées (Veulien, 2016). Il est un peu surprenant de voir fréquemment les forestiers qualifier des forêts de « surcapitalisées » bien en-dessous de leur volume atteignable en libre évolution (Martel, 2019a). Pour la plupart des essences, les charges actuelles sont même nettement inférieures à celles préconisées en sylviculture continue selon les normes de l'Association Futaie Irrégulière (Bruciamacchie & de Türckheim, 2005 ; Pro Silva Europe, 2012). Ce point important sera approfondi dans la définition des scénarios de gestion étudiés.

Les coupes interviennent de plusieurs manières sur les flux et les stocks de carbone :

1) Nature de la coupe (sélective ou totale) :

Si une éclaircie de faible intensité sans compaction du sol influence peu le cycle du carbone, la coupe rase influence les équilibres biologiques et est défavorable aux stocks de carbone dans le sol (Achat et al., 2015a-2015b ; Rupil et al., 2019 ; Augusto et al., 2019). Elle provoque aussi la mortalité rapide des systèmes racinaires, mais aussi du feuillage et du sous-bois, qui représentent jusque 24 t-eqCO_2/ha (Lousteau, 2010). La coupe définitive sur régénération acquise (renouvellement par coupes progressives) impacte moins le sol et la biodiversité, mais pourrait avoir un effet comparable sur les stocks de carbone. Enfin le taux de minéraux étant d'autant plus élevé que l'arbre est jeune (Ponette & Ranger, 2000), la pratique du taillis tend à épuiser les sols du fait du prélèvement périodique de bois jeunes.

La coupe totale (rase) par grandes surfaces est courante en France depuis plusieurs siècles par la pratique du taillis simple et de la futaie régulière. La comparaison des données IFN montre que le régime du taillis simple se maintient et que la futaie régulière (donc les coupes rases ou définitives) tend à s'étendre depuis quelques décennies, du fait principalement de l'augmentation des forêts plantées, qui concernent 14% de la forêt française en 2016 (IFN, 2018).

2) Intensité et périodicité en cas de coupe sélective :

Le stockage de carbone est affecté par l'intensité et la périodicité des coupes, qui selon certains auteurs ont déjà diminué le temps de résidence du carbone dans beaucoup de forêts boréales et tempérées (Nabuurs et al., 2013 ; Law et al., 2018). Ainsi plus le taux de prélèvement de bois est élevé, plus le stockage est faible. Dans l'étude de Valade et al., 2017 par exemple, les trois scénarios d'intensification de la récolte permettant de réduire la consommation de fossiles grâce à la biomasse dégradent le bilan-carbone jusque 2040 à 2080 selon les cas.

Indépendamment des effets du tassement du sol, l'impact de la coupe sur les stocks de carbone du sol serait significatif au-delà d'un prélèvement de 35% de la couverture (Augusto et al., 2019) ; au-delà de 55%, les pertes sont de l'ordre de 40% dans la litière et de 10% dans l'horizon organo-minéral (Achat et al., 2015a-2015b). Cet effet est encore mal connu mais ne semble aujourd'hui pas être pris en compte dans les scénarios de sylviculture pour atténuer les effets du changement climatique.

La périodicité et l'intensité des coupes varie fortement d'une sylviculture à l'autre, mais des acteurs de terrain (ex. syndicats ONF) dénoncent une augmentation des prélèvements, spécialement depuis 2000 du fait de la mécanisation et de la concentration des prélèvements dans les forêts à faible coût d'exploitation. Ce point sera abordé au chapitre 3.

3) Terme d'exploitabilité choisi :

Le terme d'exploitabilité (TE) représente l'âge (révolution) ou le diamètre maximal auquel le forestier prélève tous les arbres. En rapprochant les usages courants des sources officielles, les termes d'exploitabilité actuels courants sont de l'ordre de 40 à 55 cm en résineux (40 à 100 ans selon les essences et les stations), 50 à 70 cm en hêtre (70-120 ans), 60 à 80 cm en chêne (120-180 ans), 40 à 60 cm en feuillus dits précieux (50 à 100 ans) et 30 à 50 cm en peupliers (20-40 ans) et feuillus divers (40-80 ans). On notera que les termes d'exploitabilité sont généralement plus élevés en forêts à couvert continu (Pro Silva France, 2014). Ces termes ont subi des variations historiques, avec parfois des valeurs très basses pour les taillis (jusque 15 ans dans le Haut-Var). La plupart des rapports d'orientation actuels préconisent de raccourcir les cycles en diamètres et en âges.

En 1981, l'IFN estimait à 339 Mm^3 le stock de gros bois (GB = D.47,5-67,5 cm) et de très gros bois (TGB = D > 67,5 cm) (Pro Silva France, 2012b). En 2005-2009 (IFN, 2010) le volume bois fort tige était évalué à 421 Mm^3 pour les gros bois et 125 Mm^3 pour les très gros bois. En 2018, il serait de 522 Mm^3 (GB) et 169 Mm^3 (TGB) soit 691 Mm^3 pour GB + TGB (IFN, 2019a), ce qui représente 25% du volume total (6% pour les TGB). Les gros bois sont donc en augmentation, mais sont principalement constitués de chêne, dont la valorisation de gros diamètres pose peu de difficulté.

Certains auteurs estiment que les cycles courts seraient intéressants face au changement climatique, (Peyron, 2015 ; Roux et al., 2017), mais les recherches récentes montrent plutôt l'inverse (Martel et al., 2018 ; Ademe et al., 2018 ; Ademe, 2019). Le stock de carbone dans la biomasse est d'autant plus élevé que le terme d'exploitabilité est fort (EASAC, 2017 ; Rupil et al., 2019) et les vieux arbres sont à la fois des réservoirs et des pompes dont l'efficacité individuelle augmente avec l'âge (Stephenson et al., 2014). Le stock de carbone dans les sols serait également supérieur avec des cycles longs (Rupil et al., 2019). Enfin, pratiquer des cycles longs réduit mécaniquement la fréquence des perturbations majeures, donc le déstockage potentiel de carbone du sol entrainé par ces perturbations.

Pro Silva (2012) détaille les fonctions sylvicoles des gros bois (éducation, stabilisation, régénération, valeur). L'étude montre l'efficacité de la production relativement à l'espace occupé et à la couverture des gros bois. Elle mentionne également l'importance des gros bois pour le micro-climat tamponné dont ont besoin les autres arbres et le sol pour optimiser leur fonctionnement. Elle rappelle que les très gros bois sont largement reconnus pour leur rôle dans la préservation de la biodiversité forestière, et qu'ils ont des fonctions historiques, paysagères et sociales.

Sur le plan économique, cette étude rappelle que les couts d'exploitation sont inférieurs en gros bois – donc les dépenses énergétiques et émissions carbone liées. Le rendement de sciage augmente avec le diamètre des bois (Chalayer, 2015) mais pour les qualités médiocres et moyennes, la rentabilité du sciage de ces bois (au

ruban) est aujourd'hui plombée par la concurrence des sciages en technique « canter ». Ainsi l'étude montre que le terme d'exploitabilité doit être défini bien plus selon la qualité potentielle du bois, une récolte prématurée pouvant entrainer d'importantes pertes. Les difficultés de commercialisation des gros bois concernent bien plus les usages actuels du bois que les capacités techniques de leur transformation (Chalayer, 2015). Pour les essences et qualités demandées par la filière-bois comme le chêne, le risque se résume ainsi à la survie biologique et mécanique des arbres. La survie biologique dépend de multiples facteurs dont l'évolution climatique, mais les données IFN et DSF semblent montrer de manière assez claire que les arbres de plus de 100 ans sont statistiquement plus dépérissants que les arbres plus jeunes. Quant à la stabilité, l'idée selon laquelle les grands arbres sont plus sensibles aux vents est contestée entre autres par les travaux de Dvorak et al., (2011).

4) Devenir des branches et des souches :

L'abattage entraine la mortalité de l'arbre, donc des branches et en général aussi de la souche, qui se décomposent progressivement et ainsi émettent du carbone ; si branches et souches ne sont pas exportés, les coupes occasionnent ainsi des « pertes d'exploitation » (Lousteau et al., 2010). Leturcq (2018) estime que ces pertes représentent en tout 50% du volume récolté, soit au total pour la France 0,5 GtC/an, sans considérer les pertes du sol et d'accroissement occasionnées par la coupe. Toutefois il est probable qu'une partie au moins de ces « pertes » soient intégrées au sol donc stockées dans l'écosystème.

Par ailleurs, la récolte des branches occasionne une perte de l'ordre de 24% du stock de carbone de la litière (Achat et al., 2015a-2015b) et le prélèvement des souches et des branches appauvrit les sols en bases nutritives, donc réduit la fertilité des sols et ainsi la productivité primaire, et ainsi le stockage de carbone (Lousteau et al., 2010 ; EFESE, 2019). Selon Colin & Thivolle-Cazat (2016), pour éviter la perte de fertilité de sols, la récolte des menus bois (D < 7 cm) est à proscrire sur au moins 16% des sols forestiers en France et est fortement déconseillée sur 21% des sols forestiers. Or les forêts productives en France sont principalement situées sur des sols acides (IFN, 2015), plus sensibles à l'appauvrissement en bases.

2.4.3. Essences favorisées ou plantées

L'IFN qualifie 50% des forêts françaises en « peuplements monospécifiques » (IFN, 2010 ; IFN, 2014) du fait principalement de l'histoire des pratiques humaines (plantation, exploitation sélective, régime du taillis). Toutefois au niveau de la placette (local), les peuplements semblent plus mélangés (IFN, 2015) : 8% de la surface ne montrerait qu'une seule essence, 55% 2 à 5 essences, 32% 6 à 9 essences et 5% 10 essences ou plus. Le seuil (en surface terrière ou volume) à partir duquel on considère qu'il y a mélange est donc à préciser. On note aussi que plus de la moitié des peuplements monospécifiques se trouve dans la moitié sud de la France (IFN, 2010), du fait de l'histoire régionale combinant défrichements et reboisements sous les programmes nationaux RTM et FFN.

Il est admis que les forêts diversifiées et peu perturbées constituent des stocks de carbone supérieurs aux forêts très modifiées (CBD, 2014 et 2016 ; Mackey et al., 2015). En forêt gérée, la composition des peuplements est influencée par les coupes, les plantations et les dépressages. Les espèces arborescentes favorisées ou plantées influencent les stocks mais aussi les flux, car :

- le stockage par photosynthèse est d'autant plus élevée que la production est forte ;
- la durée de vie des arbres et leur terme d'exploitabilité dépendent de l'espèce, facteur détaillé ci-dessus ;
- la durée des produits dépend de leur nature, donc en partie des espèces d'arbre utilisées.

Certains écologues considèrent que les plantations ne sont pas des forêts, ou pas encore, du fait de leur histoire et de leurs caractéristiques (Dooley et al., 2018). Certaines études pointues montrent des émissions nettes dues au changement d'espèces par plantations (Naudts et al., 2016). La littérature actuelle indique l'avantage des peuplements mélangés pour la résilience (cfr § 2.4.1), et des effets sur la productivité primaire le plus souvent positifs (Jactel et al., 2018 ; Augusto et al., 2019). Elle montre l'avantage des peuplements mélangés pour la stabilité face aux vents (Colin et al., 2008 ; Knoke et al., 2008 ; Valinger & Fridman 2011 ; Griess et al., 2012 ; Diaz-Yanez et al., 2017). Elle montre enfin l'effet dépressif de certaines essences sur la fertilité des sols, donc sur leur capacité à fixer le carbone (EFESE, 2019). Les stocks de carbone dans la litière sont supérieurs en résineux, mais égaux entre résineux et feuillus sur l'ensemble du profil du sol (Augusto et al., 2015).

Les stratégies françaises pour l'avenir favorisent aujourd'hui l'augmentation de la surface des essences à forte production, orientation qui pour le climat serait positif pour certains auteurs (Roux et al., 2017) et négatif pour d'autres (Grace et al., 2014). Cette question délicate est un des éléments des stratégies étudiées dans ce rapport.

2.4.4. Modalités de renouvellement, travail du sol et amendements

Selon l'IFN (2018), les arbres issus de rejets sur souche représentent au total 48% des arbres recensables (D > 7,5 cm) en forêt française, mais seulement 3% des arbres dans les diamètres supérieurs à 32,5 cm.

Le rajeunissement d'une forêt peut se faire par grande coupes totales (futaie régulière, taillis simple), par coupe de petite taille ou diffuse (futaie irrégulière, taillis fureté), ou encore par grande coupe concernant une partie du peuplement (taillis-sous-futaie, futaie régénérée par coupes progressives). Ces coupes influencent les flux et stocks de carbone comme expliqué ci-dessus. L'intérêt climatique d'augmenter la photosynthèse par plantation, au détriment des stocks actuels, est fortement contesté par la littérature internationale (EFESE, 2019 ; Naudts et al., 2016). Planter plutôt que régénérer naturellement est identifié comme défavorable au bilan carbone (Augusto et al., 2019). En revanche, la conversion des taillis en futaie est identifiée comme favorable à la séquestration du carbone (Deheza & Bellassen, 2010). Schématiquement, la tendance actuelle dominante est le maintien des systèmes en taillis simple pour les stations pauvres et les climats arides, et ailleurs le renouvellement des futaies avec suppression du couvert, que ce soit pour planter ou régénérer naturellement. Or maintenir le système du taillis simple et la coupe rase entrainent des risques pour l'avenir. La coupe rase complique le renouvellement naturel, y compris en taillis car les souches finissent par s'épuiser, entrainant des problèmes de croissance ou de santé des arbres. Les grandes coupes entrainent aussi des fragilités par mise en lumière, tant sanitaires (transpiration, coups de soleil) que mécaniques (ouvertures favorisant l'effet des vents).

La préparation du sol généralement pratiquée avant plantation peut entrainer la libération de carbone par la mise en lumière du sol et le tassement (Augusto et al., 2019), en plus des émissions de carbone fossile par l'usage des machines. Le labour avant plantation induit une perte de carbone dans la litière de 35% que ne produit pas la plantation manuelle (James & Harrisson, 2016). Le tassement et le travail du sol peuvent défavoriser les mycorhizes et contraindre le fonctionnement racinaire et ainsi atteindre la santé des arbres (Nageleisen et al., 2010) donc leur productivité et leur longévité.

Pour améliorer la réussite des plantations, la gestion forestière intègre parfois l'apport au sol de cendres, de roches broyées ou d'engrais. Ces apports peuvent augmenter temporairement la photosynthèse, mais bouleversent les communautés du sol (Ecofor, 2016) et peuvent ainsi défavoriser l'activité des mycorhyzes. EFESE (2019) signale les risques des prélèvements élevés de minéraux du sol résultant d'essences à forte production et de révolutions courtes. Sur les socles géologiques acides (majoritaires sous forêts françaises), ces pratiques pousseraient les gestionnaires à amender régulièrement pour éviter les pertes de production et les dépérissements, ce qui fragiliserait l'activité biologique et renforcerait la nécessité des amendements.

2.4.5. Aspects sanitaires

Dans le contexte de changement climatique, les risques de dépérissement et leurs conséquences sur les stocks de carbone ne peuvent être négligés (Robinet & Roques, 2010 ; Choat et al., 2012 ; Reichstein et al., 2013). La mortalité des arbres entraine des émissions de CO_2. Elle est due à la compétition entre arbres, aux stress climatiques et à leurs interactions avec les pathogènes (Jactel et al., 2012), mais aussi aux pratiques humaines (Nageleisen et al., 2010). Ainsi la mise en lumière brutale par les coupes peut entrainer des mortalités, comme le tassement des sols ou les plaies de débardage sur les arbres. Les émissions générées par la mortalité peuvent remettant en cause le bénéfice du stockage (Galik & Jackson, 2009 ; Seidl et al., 2014), donc les évolutions sanitaires et les pratiques de gestion peuvent être déterminants pour le rôle que la forêt jouera dans l'atténuation du changement climatique (Roux et al., 2017). Nous approfondirons ce sujet au chapitre 3, par la notion d'impasse sanitaire et l'usage des taux de mortalité.

2.4.6. Incendies et tempêtes

Les incendies déstockent rapidement et massivement le carbone des écosystèmes. Au niveau mondial, leur probabilité et leur étendue semble être en hausse depuis 1975 (Ruffault et al., 2016 ; GIEC, 2018 ; meteofrance.fr). Leurs départs ne sont pas sous le contrôle des gestionnaires forestiers, mais le suivi des risques (DFCI), les pratiques sylvicoles et pastorales peuvent dans une certaine mesure limiter la propagation des incendies et leur impact. Ainsi la création d'accès et de coupe-feu larges et entretenus, le broyage des rémanents et du sous-bois aux abord des espaces fréquentés et le maintien de discontinuités verticales dans la végétation peuvent réduire la propagation des feux. Par la hausse de température et les vents, la mise en lumière brutale du sous-bois peut favoriser le départ et la propagation des feux, surtout en présence de rémanents de coupe (branches, andains). Les tempêtes peuvent également déstocker le carbone des forêts par chablis et volis, menant à une exploitation anticipée ou à la décomposition progressive du bois si celui-ci n'est pas récolté. De plus, les tempêtes peuvent réduire la photosynthèse en affectant le volume sur pied et la stabilité des peuplements. Sur les 30 dernières années, les tempêtes affectant le plus les forêts françaises ont eu lieu en 1999 (Lothar & Martin) et 2009 (Klaus).

2.4.7. Facteurs biophysiques

Il s'agit de phénomènes produits par l'interaction entre facteurs climatiques et organismes vivants, plus spécialement les variations d'évapotranspiration par couverture du sol (effet albédo). Les forêts feuillues et mélangées apporteraient un bénéfice climatique supérieur (EASAC, 2017). Cependant, en France les différences d'albédo entre feuillus et résineux sont faibles en raison des surfaces et périodes enneigées assez réduites (Martel, 2019a).

2.4.8. Produits réalisés et émissions générées par la mobilisation du bois

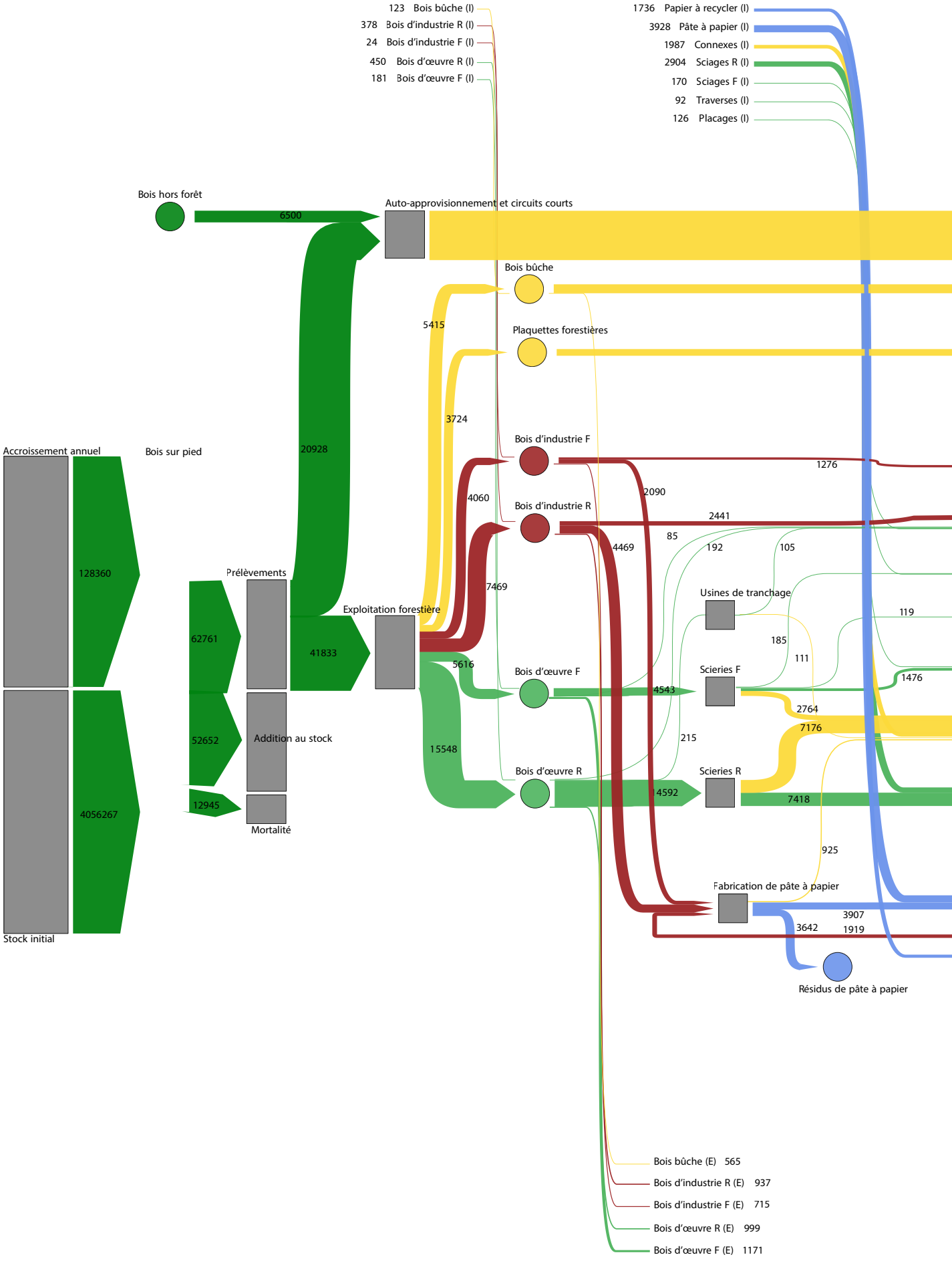
Présenté à la page suivante, le diagramme coordonné par l'INRA (2018) résume les flux dans la filière-bois. Les produits réalisés par la filière et décidés en général dès l'abattage, influencent le stockage de carbone par la durée de vie des produits réalisés, par la durée de séquestration du carbone et par les effets de substitution. Les durées de vie peuvent aller de 1 an à plus de 50 ans (CNPF, 2017), et parfois dépasser celle qu'aurait le bois laissé en forêt. Le principe de « hiérarchie des usages » demande d'utiliser le moins possible les sciages potentiels en trituration, afin d'éviter les pertes de carbone et de valeur liées (Pro Silva France, 2012a ; WWF, 2016). Cet aspect est traité au chapitre 4.

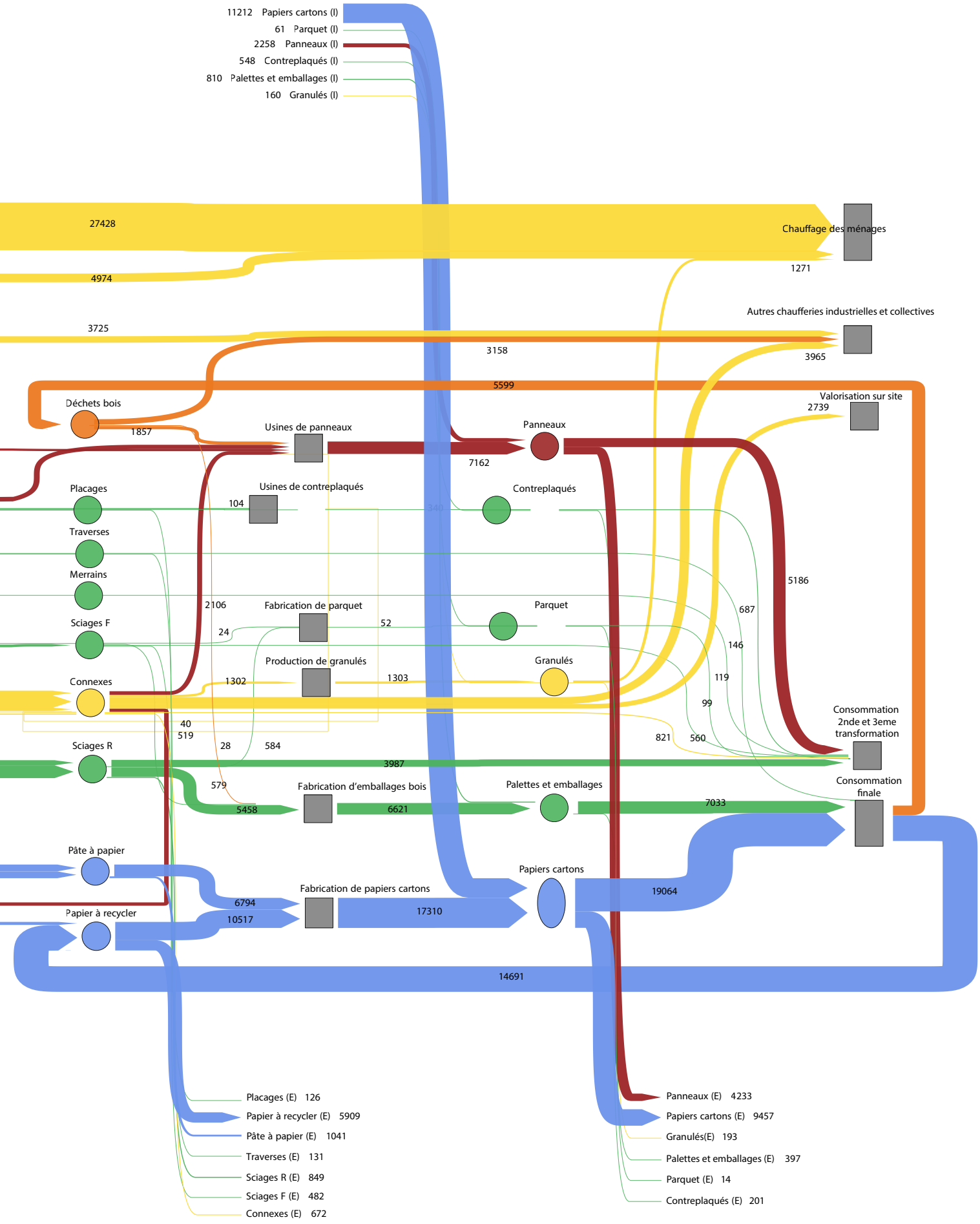
Les « émissions amont » représentent les émissions de CO_2 des machines intervenant dans les travaux sylvicoles, la mobilisation (abattage-débardage), le transport et la transformation du bois récolté. Si le transport peut impacter lourdement le bilan (Cosola et al., 2017), selon certains auteurs (Leturcq, com.orale), de l'abattage à l'utilisation du produit fini ces émissions ne dépasseraient pas 10% des émissions totales de carbone du cycle. Toutefois cette estimation dépend de nombreux facteurs et la littérature semble pauvre sur le sujet. Comme expliqué plus haut, ce flou renforcent l'instabilité des coefficients de substitution en intervenant dans les Analyses de Cycle de Vie.

Dans le contexte actuel, la tendance nette est à l'augmentation de la consommation d'énergies fossiles par m^3 exploité, du fait de la mécanisation et de l'augmentation des distances de transport entrainés par la diminution du nombre d'unités de transformation et la mondialisation des échanges (Chalayer, 2019). Pourtant l'impact du choix des techniques de travail ne semble pas être intégré aux études sur les stratégies d'atténuation.

2.5. Les stratégies d'atténuation actuelles

A l'échelle mondiale et européenne les scénarios se multiplient depuis quelques années. Nous listons ci-dessous quelques études récentes pertinentes pour ce rapport. Ces stratégies montrent des points de vue parfois diamétralement opposés sur la participation de la forêt et de la filière-bois à l'atténuation du changement climatique, en particulier au regard des intensités de prélèvement, des stratégies de renouvellement et du rôle bénéfique de la substitution.


123 Bois bûche (I)
378 Bois d'industrie R (I)
24 Bois d'industrie F (I)
450 Bois d'œuvre R (I)
181 Bois d'œuvre F (I)
1736 Papier à recycler (I)
3928 Pâte à papier (I)
1987 Connexes (I)
2904 Sciages R (I)
170 Sciages F (I)
92 Traverses (I)
126 Placages (I)
Bois hors forêt
6500
Auto-approvisionnement et circuits courts
Bois bûche
Plaquettes forestières
5415
3724
20928
Accroissement annuel
Bois sur pied
128360
4056267
Stock initial
Prélèvements
62761
52652
12945
Addition au stock
Mortalité
Exploitation forestière
41833
Bois d'industrie F
Bois d'industrie R
4060
7469
5616
15548
Bois d'œuvre F
Bois d'œuvre R
1276
2090
2441
85
4469
192
105
Usines de tranchage
119
185
111
Scieries F
Scieries R
1476
4543
2764
7176
215
14592
7418
925
Fabrication de pâte à papier
3907
1919
3642
Résidus de pâte à papier
Bois bûche (E) 565
Bois d'industrie R (E) 937
Bois d'industrie F (E) 715
Bois d'œuvre R (E) 999
Bois d'œuvre F (E) 1171


11212 Papiers cartons (I)
61 Parquet (I)
2258 Panneaux (I)
548 Contreplaqués (I)
810 Palettes et emballages (I)
160 Granulés (I)
27428
4974
Chauffage des ménages
1271
3725
Autres chaufferies industrielles et collectives
3158
3965
5599
Déchets bois
1857
Usines de panneaux
Panneaux
7162
Valorisation sur site
2739
Placages
104
Usines de contreplaqués
Contreplaqués
340
Traverses
Merrains
5186
2106
Fabrication de parquet
Parquet
687
Sciages F
24
52
146
Production de granulés
Granulés
Connexes
1302
1303
119
99
40
519
28
584
821
560
Consommation 2nde et 3eme transformation
Sciages R
3987
579
5458
Fabrication d'emballages bois
6621
Palettes et emballages
7033
Consommation finale
Pâte à papier
Papiers cartons
19064
6794
10517
Fabrication de papiers cartons
17310
Papier à recycler
14691
Placages (E) 126
Papier à recycler (E) 5909
Pâte à papier (E) 1041
Traverses (E) 131
Sciages R (E) 849
Sciages F (E) 482
Connexes (E) 672
Panneaux (E) 4233
Papiers cartons (E) 9457
Granulés(E) 193
Palettes et emballages (E) 397
Parquet (E) 14
Contreplaqués (E) 201

Etude	Périmètre	Période	Scénarios
Colin et al., 2014	France métrop.	2020-2030	2 scénarios : Maintien des pratiques actuelles – Dynamique (augmentation des prélèvements, réduction des termes d'exploitabilité, plantations).
Roux et al., 2017	France métrop.	2018-2050	3 scénarios : Extensification (-26% de prélèvement en 2050) – Dynamiques territoriales (simplification et spécialisation des sylvicultures + maintien des prélèvements actuels) – Intensification (+40% de prélèvement en 2050 et plan de reboisement important).
Valade et al., 2017	France métrop.	2010-2050	5 scénarios : Maintien des pratiques actuelles – Intensification des prélèvements dans toutes les forêts gérées (m) – Eclaircie dans toutes les forêts en « surdensité » (o) – Mobilisation dans toutes les forêts « sur-matures » (d) – Scénarios combinés (m + o + d).
Dooley et al., 2018	Monde	2019-2050	1 scénario : arrêter la déforestation / augmenter de 350 Mha la surface boisée par accrus et plantations / augmenter de 25% la surface des forêts en libre évolution pour arriver à 50% en tout / gérer les forêts exploitées de manière « responsable » (allonger les cycles, réduire les perturbations au sol …). Effets de substitution non comptabilisés.
Bötcher et al., 2018	Allemagne	2019-2100	3 scénarios : maintien des pratiques actuelles – restructuration par plantations (augmentation des prélèvements, promotion des résineux) – Forest Vision (hausse des surfaces en libre évolution, hausse des termes d'exploitabilité, réduction des prélèvements, feuillus favorisés). Effets de substitution non comptabilisés.

Les scénarios « extensifs » augmentent les stocks dans l'écosystème mais réduisent les prélèvements, les scénarios « intensifs » sont valorisés par les produits et leurs effets de substitution. Dans les études développant l'option intensive, les scénarios extensifs sont parfois définis de manière peu cohérente, avec des gestionnaires jugés « passifs et anticipant mal les évolutions » face aux gestionnaires intensifs qualifiés de « actifs et éclairés » (Roux et al., 2017). Dans cette approche, des scénarios intermédiaires et plus subtils ne sont pas testés, alors que cela était possible et intéressant (Martel, 2019).

Les risques des scénarios intensifs sont significatifs au regard des pertes de stock entre 2020 et 2050, du poids accordé aux effets de substitution énergie et matériau et des conséquences des forts prélèvements et des reboisements prévus sur la fertilité des sols et la biodiversité (essences à forte production, cycles courts, récolte des rémanents…). Les forêts à caractère « naturel » sont également présentées comme plus vulnérables que des plantations (Peyron, 2015), ce qui aujourd'hui va à l'encontre de la littérature. Dans une étude approfondie, Lousteau et al., (2010) ont montré que les scénarios de sylviculture intensive et certaines essences productives comme le peuplier, sont plus sensibles au changement climatique. Par ailleurs, les liens entre espèces construits par co-évolution pourraient favoriser la résilience des individus et des écosystèmes anciens. Enfin, on peut aussi s'interroger sur les émissions générées par les programmes de plantation, et par le bilan carbone de filières basées sur des bois de faibles dimensions.

Dans le chapitre suivant, nous développons une stratégie nationale cherchant un compromis entre ces différentes approches, pour maximiser le rôle de la forêt et de la filière-bois dans le cadre d'une gestion forestière multifonctionnelle.

3. PROPOSITION STRATÉGIQUE

3.1. Introduction

En l'absence de changement dans les pratiques, atteindre la neutralité carbone supposerait une réduction de 90% des émissions de CO_2 en 2050 par rapport aux émissions de 1990 (EFESE, 2019). Lors du Grenelle de l'Environnement (2007) la France s'est ainsi engagée à réduire par 4 d'ici 2050 les émissions françaises de 1990. Or selon Luyssaert et al. (2018), l'effet climatique de la forêt et le potentiel d'atténuation qu'elle représente est significatif, mais reste modeste au regard de l'enjeu et de l'urgence. **Ainsi réduire les émissions doit rester une priorité incontournable :** l'effort d'atténuation porté sur la forêt doit être circonscrit aux émissions rendues incontournables après application d'une politique combinant sobriété dans les besoins, efficacité énergétique et usage des énergies renouvelables décarbonées (solaire, éolien, hydraulique).

La proposition faite ici consiste à optimiser le rôle climatique de la forêt française tout en préservant au mieux les autres services fournis par les écosystèmes :

- préserver la biodiversité et en particulier les espèces et habitats typiquement forestiers ;
- préserver la stabilité et la fertilité des sols ;
- protéger la qualité des eaux de surface et réguler leur débit ;
- fournir des ressources matérielles et préserver et développer des emplois locaux de qualité (attractifs) ;
- permettre le développement des services éducatifs et touristiques en forêt.

Pour développer cette proposition, nous avons consulté plusieurs études (Angerand et al., 2014 ; Rossi et al., 2015 ; Lebreton, 2015 ; Valade et al., 2017 ; EASAC, 2017 ; Böttcher et al., 2018 ; Dooley et al., 2018 ; UICN, 2018) et appuyé nos positions sur la littérature résumée au chapitre précédent. Les publications sur l'atténuation climatique sont nombreuses, mais celles abordant les choix concrets de sylviculture et de filière dans le contexte de la forêt française sont encore assez rares.

L'objectif étant de stabiliser le climat à +1,5°C (GIEC, 2018), l'étude prend pour hypothèse le scénario climatique RCP 2.6 jusque 2050 comme l'a fait l'INRA dans une étude majeure sur le sujet (Roux et al., 2017). Ce choix n'est pas périlleux car les scénarios diffèrent surtout après 2050, seuil de possible emballement climatique. Si la hausse du taux de CO_2 atmosphérique produit un gain de photosynthèse (Seguin, 2010), dans le scénario RCP 8.5 (changement aggravé) au-delà de 2050 ce gain serait annulé par l'effet dépressif de la température, qui pourrait encore être renforcé par une baisse de fertilité et les difficultés d'assimilation minérale des arbres (Martel et al., 2019). Prédire le rôle de la forêt au-delà de 2050 est donc particulièrement délicat et nous ne nous risquerons pas à compter sur les bénéfices de choix de gestion au-delà de 2050 comme le font Roux et al., (2017). Toutefois nous testerons les scénarios développés dans un contexte de mortalité élevé, malheureusement possible.

La littérature étudiée au chapitre 2 montre que pour stocker du carbone, on devra (1) préserver et si possible augmenter les stocks aériens et sous-terrain, (2) préserver et augmenter les stocks dans les produits-bois, (3) substituer le bois aux matériaux concurrents si les émissions générées par la filière-bois sont inférieures à celles générées par les filières concurrentes.

Les propositions sont construites pour la France métropolitaine, Corse incluse. Le cas des peupliers est traité à part en gestion « au fil de l'eau » (maintien des pratiques actuelles).

Afin d'établir la proposition stratégique, nous commençons par étudier les volumes actuellement récoltés, les surfaces réellement gérables compte-tenu des obstacles et les volumes mobilisables correspondants. Cette étude, inspirée du protocole de l'Ademe (Colin & Thivolle-Cazat, 2016), permet d'estimer la marge de volume potentiellement récoltable afin de cadrer les scénarios.

3.2. Un préalable : analyser les limites à l'augmentation des prélèvements

3.2.1. Surfaces gérées, production et prélèvements actuels

Depuis au moins une décennie, la surface des forêts françaises et des milieux naturels semble se stabiliser voire réduire légèrement, sous l'effet principal de l'urbanisation. CGDD (2015) montre ainsi qu'entre 1990 et 2012 leur surface est passée de 18,8 à 18,6 Mha, tandis que les milieux artificialisés gagnaient 0,5 Mha (+20%) et les milieux agricoles restaient à peu près stables.

La surface de forêts bénéficiant d'un document de gestion durable (PSG, RTG, CBPS) est estimée en à 7,6 Mha (IFN, 2015) soit 48% de la forêt française. Dans ces surfaces une partie n'est en réalité pas ou très peu exploitée, tandis qu'une partie des 52% sans document est exploitée. Il est difficile d'estimer la surface de forêts effectivement concernée par des prélèvements de bois en 2019 ; Valade et al., (2017) estiment la part de forêts « activement gérées » à 63% donc il est probable que l'assiette actuelle des coupes soit de l'ordre de 65%, chiffre que nous retiendrons pour la suite de l'étude.

Concernant les volumes produits et récoltés, pour éviter toute confusion on rappelle ci-dessous la décomposition classique de la biomasse d'un arbre (Colin & Thivolle-Cazat, 2016) :

Bois fort tige (Bft) = tige principale de l'arbre jusqu'au diamètre 7 cm ;
Bois fort total = Bft + branches jusqu'au diamètre 7 cm ;
Biomasse aérienne = bois total de la tige et des branches ;
Biomasse racinaire = bois total des racines ;
Menus bois = biomasse aérienne – bois fort total.

Hors peupliers cultivés, la production annuelle brute de bois fort tige (Bft) sur écorce de la forêt française métropolitaine est aujourd'hui estimée à 91 Mm^3/an et la mortalité à 9 Mm^3/an (IFN, 2018), soit 82 Mm^3/an déduction faite de la mortalité (production nette). Les chiffres IFN sont issus de la période 2008-2016, donc en 2019 la mortalité réelle doit atteindre 10 Mm^3/an. Ils n'intègrent pas les prélèvements suite aux fortes tempêtes et en particulier Klaus en 2009, épisode qui a généré 41 Mm^3 mais a réduit les récoltes ultérieures. La production brute pouvant être inférieure (86 Mm^3/an selon FCBA, 2018), on retiendra les valeurs de 90 et 80 Mm^3/an. Avec les coefficients d'expansion de Lousteau et al. (2010), la production totale de bois aérien s'élève à 135 Mm^3/an (brute) ou 120 Mm^3/an (nette). La production nette moyenne totale (tige + branches) en France serait donc de 7,5 m^3/ha/an.

La Stratégie Nationale Bas Carbone (MTES, 2018a) donne pour 2018 une production brute totale de 125 Mm^3/an et un prélèvement total de 70 Mm^3, avec des pertes d'exploitation de 10 Mm^3/an.

Selon l'IFN (2019), on a récolté en tout 45 Mm^3 de bois fort tige en 2018, soit 50% de la production brute ou 56% de la production nette. Les résineux sont exploités à 69% et les feuillus à 47%, avec des essences récoltées à moins de 40% (chênes pubescent et vert, feuillus divers) ; près des 2/3 des prélèvements se font en forêts faciles à exploiter. 71% du volume est prélevé en forêt privée (qui représente 75% de la surface).

Les données IFN sont basés sur des observations de terrain, mais ne donnent que les prélèvements bois fort tige et non de récolte totale. Les chiffres issus des Enquêtes de Branche (EAB) et des enquêtes de consommation des ménages (CEREN) donnent pour la période 2011-2015 un prélèvement total de 53 Mm^3/an sans les

pertes d'exploitation (estimées à 7 Mm³/an), mais les données de base sont anciennes (2006 pour CEREN) et les prélèvements « domestiques » y sont clairement sous-estimés (qui selon CNPF, 2017 seraient plutôt 25 Mm³/an au lieu de 15). Avec 21,5 Mm³/an de prélèvements domestiques, FCBA (2018) estime en 2016 le prélèvement total à 59,4 Mm³/an.

Au final, pour la production et les prélèvements actuels nous retiendrons :

	Production (Mm³/an)		Prélèvement* (Mm³/an)	Taux de prélèvement en % de P-nette*
	Brute	Nette		
Bois fort tige	90	80	45	56%
Bois aérien total	135	120	60	50% (+ pertes 8%)

** Pertes d'exploitation déduites.*

Il est plus fiable de prendre pour référence la productivité nette, car le prélèvement de la mortalité n'est pas estimé à part. Etant donné le non-intégration des chablis importants (type Klaus), les prélèvements ci-dessus pourraient être sous-estimés. Dans tous les cas, les chiffres sont marqués d'une incertitude de l'ordre de 10% selon IFN, Agreste et Ademe.

On note que selon FCBA (2018) et CGDD (2019), la production d'énergie à partir de bois serait d'environ 10 Mtep (tonne équivalent-pétrole) par an, ce qui correspond à 49 Mm³/an soit 81% de la récolte totale. Ce chiffre semble élevé et pourrait signifier une récolte réelle totale supérieure aux estimations actuelles, ou une sous-estimation des rendements énergétique du bois. La demande en bois-énergie est en hausse, mais la forte marge d'amélioration possible dans les équipements de combustion devrait à l'avenir réduire la consommation par unité de chauffe.

Si l'assiette des coupes concerne 65% des forêts françaises, en supposant une production supérieure de 10% dans ces forêts par rapport aux 35% non gérés (plus souvent jeunes et/ou en stations pauvres), les forêts gérées produiraient 57 Mm³/an bois fort tige et elles subiraient un taux de prélèvement de 80%. L'estimation de 75% par les syndicats de l'ONF (CGT-forêt et Snupfen-Solidaires) ne semblait donc pas trop forte. Il est normal de ne pas être à 100% étant donné les parcelles jeunes, devant capitaliser avant de pouvoir faire l'objet de coupes. Certains forestiers de ces syndicats estiment que les taux sont plus élevés encore en forêts domaniales.

Les possibilités actuelles d'augmenter les prélèvements doivent être analysées au regard de la production biologique et de la mortalité, mais aussi des prélèvements actuels et de l'ensemble des obstacles techniques et fonciers à la mobilisation du solde non prélevé.

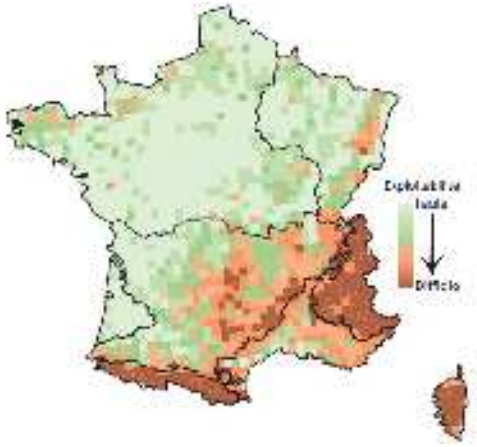
3.2.2. Obstacles à la mobilisation du bois

1) Exploitabilité

Les difficultés techniques d'exploitation combinent plusieurs facteurs (IFN 2012a) :

Piste	Terrain	Praticable (non accidenté et portant)			Praticable (accidenté ou mouilleux)		
	Pente / Distance de débardage	0-15%	15-30%	> 30%	0-15%	15-30%	> 30%
Existante	< 200 m						
	200 - 1000 m						
	1000 - 2000 m						
	> 2000 m						
À créer	quelconque						
Impossible	quelconque						

Exploitabilité *Facile* *Moyenne* *Difficile* *Très difficile*



Aujourd'hui :

- **un tiers de la forêt française est considérée difficile ou impossible à exploiter** selon le tableau ci-dessus (13 à 68% selon l'essence), Ces surfaces sont principalement situées dans des zones de montagne, à fort taux de boisement, à majorité résineuse (IFN, 2012a) et actuellement avec les plus faibles prélèvements. Ainsi des essences comme le sapin pectiné, le pin sylvestre et l'épicéa commun et le hêtre ont la moitié de leur volume actuel classé comme difficile à exploiter (IGN, 2018). En réalité, 64% de la production est prélevée sur les surfaces faciles à exploiter et 36% dans les surfaces difficiles à exploiter (IGN, 2018) ;
- 7% est située sur des pentes de plus de 60% (exploitation difficile voire impossible), soit 21% des forêts difficiles à exploiter ;
- 10% est située sur des terrains accidentés à très accidentés, soit 30% des forêts difficiles à exploiter.
- les distances de débardage dépasseraient 1 km pour 6,4% des surfaces (IFN, 2019a), surfaces sur lesquelles aujourd'hui seuls 31% de la production serait récoltée (IFN, 2014 ; IFN, 2019a).
- 1% des sols forestiers ne seraient jamais portants et 75% sont temporairement non-portants (IFN, 2012a), donc imposent une limitation des périodes de travail et du tonnage **;**

Mais **d'autres obstacles** se rajoutent à ces constats, rendant certaines surfaces inexploitables du fait :

- d'un aménagement rendu impossible ou extrêmement couteux en raison de points noirs (hameaux aux passage étroit, torrents, barres rocheuses, blocs rocheux, éboulis et terrains instables) ;
- de transports trop coûteux au regard de la valeur des bois livrés, suite à la raréfaction des scieries ;
- d'arbres dépassant le diamètre de sciage techniquement possible (dits « surmatures » par certains auteurs dont Valade et al., 2017).

On pourrait également considérer l'empreinte carbone de l'abattage à la livraison des bois, qui dans certains cas serait trop élevée pour justifier le prélèvement.

En considérant tous ces obstacles, pour cette étude on considérera qu'au moins 25% des surfaces classées difficiles à exploiter par l'IFN sont définitivement non-exploitables et que **33% ne pourront pas être exploitées d'ici 2050,** ce qui donne 0,33 × 33% = **11% de la forêt française**. Dans nos scénarios, ces 11% sont ventilés par essence selon les estimations IFN.

2) Verrous fonciers

Dans les 89% de surfaces considérées physiquement exploitables d'ici 2050, la marge principale se situe dans les forêts communales et dans les petites forêts privées sans gestion. Mais pour que les prélèvements soient réalisables, il faut qu'ils soient légaux et acceptés par les propriétaires. Ainsi, à cette analyse technique il se rajoute plusieurs **verrous fonciers et sociaux** actuels, dont l'importance jusque 2050 est assez difficile à estimer mais ne peut être négligée :

- Le statut de protection de la forêt en raison d'enjeux forts pour le sol (glissement de terrain, proximité de zones bâties) ou pour l'eau (tourbière, captages, débits de crues), ces verrous pouvant jouer sur l'exploitation des forêts concernées mais aussi la desserte pour des forêts mitoyennes. En 2015 il y a 0,35 Mha de forêts de protection en France (IGN, 2015) soit 2,2%, mais celles-ci sont souvent exploitées. En revanche certains espaces à fort enjeu sont aujourd'hui non protégés légalement. En conséquence nous estimons ces surfaces à **2%**.
- Le statut de protection en raison d'enjeux forts pour la biodiversité (valeur patrimoniale, connectivité). Les réserves intégrales forestières couvrent aujourd'hui 0,02 Mha en France (0,1%), les Zones Cœur de Parc Nationaux 0,15 Mha (0,9%), les réserves (naturelles nationales, régionales et de Corse, biologiques intégrales et dirigées, intégrales de Parc National), ilots de sénescence en forêts domaniales et arrêtés de protection de biotope en tout 0,23 Mha (1,4%), ce qui ferait un total de 2,4% avec toutefois des redondances possibles et 60% en exploitation réglementée (Cateau et al., 2017). En revanche certaines surfaces à fort enjeu ne sont aujourd'hui pas légalement protégées. On retiendra ainsi **2%** de la surface.

- Les points noirs décrits ci-dessous peuvent aussi concerner des forêts physiquement exploitables situées en aval et non accessibles par ailleurs : nous estimons la surface à **1%**.
- Le rôle d'accueil des forêts, qui peut orienter fortement la sylviculture (cfr ONF, IDF) mais aussi limiter les prélèvements possibles. Nous retiendrons **1%**.
- Le morcellement (taille et dispersion des unités), qui même avec des protocoles de remembrement très longs et couteux (type AFAFE) ne peuvent régler tous les problèmes techniques et humains. Nous retiendrons **5%** de la surface.
- La liberté du propriétaire, qui peut choisir de ne pas exploiter sa forêt ou de n'y faire que des prélèvements ponctuels et réduits pour un usage domestique. Au moins un quart des propriétaires de 4 à 10 ha pourraient seraient enclins à refuser les coupes (Maresca & Picard, 2010 ; Didolot & Thomas, 2015). Pour ce critère nous retiendrons **4%**.

La somme donnerait 15% mais certaines contraintes peuvent se superposer. Ainsi, pour les forêts physiquement exploitables, par sécurité on retiendra un **taux global de 12% de blocage foncier, soit 11% de la forêt française**.

3.2.3. Surfaces gérables et limites à l'augmentation des prélèvements

En considérant tous les obstacles à la mobilisation comme expliqué ci-dessus, on obtient un **total de 22% de la surface non exploitable (11+11) et 78% de surface potentiellement exploitable soit 12,6 Mha**. Compte-tenu du tableau de production ci-dessus, cette surface produirait en tout 95 Mm^3/an nets ou 63 Mm^3/an de bois fort tige.

Si on prélève 100% de la production biologique nette sur les 12,6 Mha exploitables d'ici 2050, **on pourrait prélever 18 Mm^3/an de plus en bois fort tige** (pertes d'exploitation déduites) ou 35 Mm^3/an en bois total, soit un **prélèvement total de 95 Mm^3/an**. Ce maximum correspond aux scénarios classiques actuels d'augmentation des prélèvements depuis le discours de Sarkozy à Urmatt en 2009 (Solagro, Ademe, MAAF, MTES). Il suppose toutefois que de nombreux blocages fonciers actuels soient levés (morcellement, accès) dont certains sont peut-être sous-évalués ici, et surtout :

- il ne tient pas compte de la probable hausse des taux de mortalité
- ni des surfaces aujourd'hui sous-capitalisées car jeunes ou impactés par les tempêtes (ex. Landes) ;
- et suppose soit l'exploitation totale des branches (100% de la production nette) ce qui est physiquement impossible et affecterait le sols (sans parler du bilan énergétique), soit de forts prélèvements sur la mortalité naturelle, ce qui peut être techniquement difficile et impactera la biodiversité.

Ces limites étaient déjà indiquées par l'IFN en 2005 (IFN, 2005). La perspective de prélever 95 Mm^3/an est donc un maximum absolu, qui ne pourra être atteint rapidement et qui aura des conséquences écologiques fortes. Nous étudierons en détail cette option.

Dans la stratégie d'atténuation 2020-2050 développée dans ce rapport, deux limitations supplémentaires aux prélèvements sont intégrées :

- l'augmentation nécessaire du capital sur pied en peuplements jeunes, qui impose un prélèvement inférieur à la production nette ;
- la nécessité d'augmenter les surfaces en libre évolution et les volumes de bois mort pour le bon fonctionnement des écosystèmes et le maintien de la biodiversité.

3.3. Axe 1 : Préserver et augmenter les stocks dans l'écosystème

La Stratégie Nationale Bas Carbone (MAAF, 2018) insiste sur l'importance de conserver les stocks de carbone actuels. Augmenter les stocks de carbone dans les forêts existantes est une mesure peu couteuse pour

augmenter le puits (EASAC, 2017). La première stratégie est de laisser en libre évolution une surface globale importante, comme expliqué en partie II. La deuxième est de préserver et augmenter les stocks dans les forêts gérées, soit : (1) garder une couverture boisée pour maintenir la fertilité et les équilibres biologiques afin de garantir la continuité de la production primaire ; (2) atteindre progressivement le stock maximal de bois sur pied compatible avec un prélèvement et une régénération continus.

3.3.1. Etendre et sécuriser les surfaces en libre évolution

Le rôle positif des surfaces en libre évolution et des stocks élevés de carbone par hectare est reconnu, comme expliqué en partie II. Dans notre stratégie, on exclut des surfaces en gestion sur 2020-2050 les 22% « bloqués » comme établis ci-dessus. De ces 22%, on estime que 7% pourrait être classé en réserve intégrale afin de garantir leur rôle pour le carbone et la biodiversité.

Pour des raisons tant de diversité des habitats que de connectivité (flux de gènes), il est nécessaire de ne pas préserver uniquement des forêts dans des espaces non-exploitables. On propose ainsi d'établir volontairement 4% de l'ensemble des forêts française « exploitables » en libre évolution soit 3% de la forêt française, ce qui mènerait en tout à **10% légalement et durablement classé en libre évolution (1,6 Mha)**, sous forme de RBI ou d'un autre statut. Ces 3% sont répartis entre les essences selon l'intérêt écologique des écosystèmes (essences, présence de gros et très gros bois, risques sanitaires pour temporiser la mortalité, valeur économique des bois pour réduire les pertes de plus-value économique). Il est important également de répartir les surfaces dans tous les territoires, avec de grosses et de petites réserves intégrales et des corridors les reliant, dont les ilots de sénescence en forêts gérées par l'ONF (optimisation de type « SLOSS » : Diamond, 1975 ; Wilcox & Murphy, 1985).

Ainsi dans le scénario de gestion proposé, **3% de la forêt française** est volontairement mise en libre évolution en plus des 22% bloqués, soit en tout **25% de la forêt française (4,0 Mha)** sans prélèvements entre 2020 et 2050. Ceci correspond aux préconisations de Dooley et al., (2018).

3.3.2. Renouveler les peuplements en impasse sanitaire

La **notion d'« impasse »** est progressivement entrée dans le vocabulaire courant des forestiers sans être bien définie. Selon CNPF 2018, elle caractérise une parcelle « vouée à un arrêt de croissance en l'absence de renouvellement », du fait d'un peuplement « hors station, en mauvais état sanitaire, instable ou dépérissant ». Le terme rassemble ainsi des considérations de survie biologique des arbres mais aussi de production, généralement non clarifiées :

- la croissance minimale attendue par le sylviculteur n'est pas définie ;
- le caractère « hors station » n'a de sens que pour un objectif et un terme temporel définis ;
- le qualificatif « sans renouvellement » est relatif aux essences, aux densités et au rythme d'installation et de production attendus par le sylviculteur ;
- l'évaluation de la stabilité, concernant essentiellement les peuplements en situations très ventées et/ou en « retard d'éclaircie », est souvent perturbée le schéma de coupe imposé (éclaircie forte), qui augmente cette instabilité au point de condamner le peuplement après l'opération ;
- le caractère « dépérissant » est relatif aux capacités de résilience et aux risques que le propriétaire est prêt à prendre au regard des bénéfices du maintien des arbres en production ;

Dans la pratique, l'impasse est souvent désignée en usant de ces arguments sans les objectiver. L'aspect commercial suffit parfois même, lorsque le diamètre et/ou la qualité des arbres sont peu attractifs pour le marché dominant. **En résumé, la notion d'impasse est large et confond aujourd'hui des aspects biologiques et stratégiques.**

Toutefois, l'évaluation des surfaces en impasse nous semble indispensable au vu de l'état sanitaire actuel de certains peuplements et des interactions entre la dynamique de ces peuplements et les évolutions climatiques en cours. Pour cette étude, nous avons retenu ce terme en le définissant plus précisément, pour différencier

les situations de crise avérées ou très probables liées à une forte vulnérabilité mécanique ou sanitaire (impasse réelle), par rapport aux situations où le jugement d'impasse justifie un choix d'accélérer la récolte et de renouveler les peuplements par coupe rase et plantation.

Pour être plus rigoureux, le peuplement dit « en impasse » devrait cumuler deux caractères :

1) un état sanitaire compromis selon le DSF, soit avec au moins 20% des arbres présentant plus de 50% de branches fines mortes (feuillus) ou de pertes foliaire (résineux) selon le protocole Deperis (Goudet & Nageleisen, 2019) ;
2) une régénération naturelle absente ou ne pouvant garantir un peuplement futur fermé atteignant au moins la hauteur dominante de l'association phytosociologique naturelle de la station.

La première condition est incontournable ; si elle est remplie sans la seconde, le bois sera récolté en une ou plusieurs fois selon le rythme de dépérissement et les sacrifices d'exploitabilité engendrés, mais le peuplement ne fera pas l'objet d'un reboisement (ce qui impose abattage et débardage soignés).

Néanmoins le seuil DSF de 20% nous semble trop bas car pour certaines essences, l'arbre défolié à 50% à certaines saisons peut tout à fait être résilient. Le caractère dépérissant d'un peuplement devrait être défini plus finement en considérant les capacités de résilience au moyen par exemple de la méthode « Archi » (Sajdak, 2019 ; Drénou & Caraglio, 2019). Le risque mécanique (chablis et volis) est difficile à prévoir et nous considérerons qu'il peut être absorbé dans le risque sanitaire, car la vulnérabilité des peuplements à ce facteur est fortement augmentée par le dépérissement. Si la première et la seconde condition sont réalisées, le peuplement est récolté et renouvelé par plantation.

Quatre situations parfois qualifiées d'impasse par les gestionnaires ont ainsi été écartées :

1) les taillis dits « non-améliorables » avec assez de tiges dynamiques donc qui peuvent être balivés pour autant que l'opération ne soit pas violente (ex. châtaignier) ;
2) les peuplements sains mais jugés « peu productifs » car ils constituent un stock de carbone et ont un intérêt paysager, social et écologique ;
3) les peuplements accessibles dits « surcapitalisés » par retards d'éclaircie car ils peuvent être travaillés par des éclaircies prudentes ;
4) les peuplements présentant une majorité de diamètres trop élevés pour être physiquement sciables ($D > 1$ m) car ils occupent aujourd'hui des surfaces négligeables.

Le scénario principal proposé prévoit donc de ne remplacer par plantation que les peuplements voués au dépérissement. Ces peuplements sont principalement constitués de plantations aujourd'hui hors station (ex. épicéa), de taillis épuisés car recépés de nombreuses fois (ex. châtaignier), d'essences en crise sanitaire (frêne) et secondairement, de surfaces en limite d'aire pour certaines essences (hêtre, chêne pédonculé). On note que définir le caractère « hors station » d'une essence devrait se baser plus sur la notion de niche climatique (écologique) que d'enveloppe climatique (statistique), mais cette approche demanderait une analyse poussée pour chaque essence.

Nous n'avons utilisé le concept d'impasse que pour les forêts gérées, les surfaces reprises en libre évolution étant à choisies parmi les peuplements les plus résilients pour éviter des mortalités massives d'ici 2050, même si nous y prévoyons un régime de mortalité croissant (cfr chapitre 4). Concrètement, les surfaces en impasse ont été estimées pour chaque essence par les chiffres 2014 de déficit foliaire (IGN, 2015) par l'expression : % moyen de déficit foliaire x % d'arbres avec plus de 60% de perte foliaire, ceci en augmentant les taux pour les espèces dont la situation se dégrade depuis 1997. On déduit alors 25% des surfaces obtenues, correspondant aux surfaces sans gestion (§ 2.2.3).

Ce premier filtre donne en 2019 entre 4 et 18% des surfaces selon l'essence principale (extrêmes hautes frêne et châtaignier, extrêmes basses pins et chêne pubescent), et au total 946.000 ha soit 5,9% de la forêt française. Toutefois, dans les peuplements mélangés si une seule essence non majoritaire dépérit, elle ne mettrait pas le peuplement en impasse pour autant que les autres soient mécaniquement stables. C'est le cas des mélange châtaignier-chêne (châtaignier fragile), chêne-pin (chêne pédonculé fragile) et sapin (épicéa fragile). De plus,

selon la littérature les mélanges sont plus résilients que les peuplements purs (chapitre 2). Des peuplements jugés en impasse dans une stratégie recherchant des parcelles homogènes (futaie régulière homogène ou taillis simple), ne le seraient pas dans une stratégie utilisant la diversité des diamètres et des essences pour franchir les crises (couvert continu et conversion par balivage) : la vision même de l'avenir peut être influencée par la sylviculture choisie. Dans cette étude, pour les mélanges nous avons retenu la stratégie de maintien du couvert grâce aux arbres en place tant que leur état sanitaire et mécanique le permet. Pour chaque essence nous avons exclu des impasses une partie des surfaces correspondant aux peuplements mélangés selon les chiffres IFN : aux surfaces en impasse des essences individuelles, nous appliquons une décote de 20% en résineux et en non-recensables, et de 40% en charme, feuillus et résineux divers (presque toujours mélangés). On considère également que les peuplements de chêne vert en impasse ne feront pas l'objet de reboisement étant donné le faible potentiel des stations correspondantes. Il faudrait toutefois estimer le risque d'avoir, dans les peuplements mélangés, des poches pures pouvant créer des situations d'impasse locale du moins temporaire. En revanche, certaines surfaces classées ici en impasse pourraient néanmoins bénéficier d'une régénération naturelle adaptée grâce aux semenciers de peuplements voisins. On considèrera que ces deux effets se compensent.

On obtient ainsi le tableau présenté à la page suivante. En 2019 les surfaces en impasse à remplacer par plantation sont estimées **à 486.000 ha en tout soit 3,0% de la forêt française**. Cette estimation mériterait cependant des recherches plus approfondies, par exemple pour le sapin, l'épicéa et le chêne pédonculé. Par ailleurs, de nouvelles surfaces en impasse seront probablement identifiées entre 2020 et 2050. Ainsi pour développer nos scénarios, au paragraphe 3.6.4 nous supposons une évolution de la surface totale en impasse selon le taux de mortalité représentant le scénario climatique.

3.3.3. Pratiquer une sylviculture à couvert continu

Nous utiliserons les terme **sylviculture continue ou « en couvert continu »** pour désigner une orientation évitant délibérément la rupture de la canopée, définie par la Sylviculture Irrégulière, Continue et Proche de la Nature (SICPN) (Duchiron, 1994 ; Bruciamacchie & de Turckheim, 2005 ; Pro Silva Europe, 2012 ; Pro Silva France, 2014). Elle consiste à évoluer vers un capital oscillant autour d'un « volume d'équilibre », permettant de prélever ensuite la production nette de manière sélective par la « coupe de jardinage ». La SICPN n'interdit pas la coupe définitive (tous les arbres) mais en limite tant que possible la surface, selon le tempérament de l'essence (sciaphile/héliophile), l'état du peuplement (santé, diamètres, stabilité) et la présence de régénération. L'irrégularité n'est pas un objectif en soi, et s'obtient par petites ou plus grandes unités selon le cas (pied à pied, par bouquets, par petits parquets). Dans la sylviculture continue, le terme d'exploitabilité n'est pas la variable « déclenchant le renouvellement de la parcelle », il intervient dans la répartition du prélèvement entre les arbres lors du martelage et dans le volume par hectare à l'équilibre. Le prélèvement est ainsi déterminé arbre par arbre, au moyen de critères multiples combinés par l'opérateur de terrain à l'échelle de la parcelle (équilibre des classes d'âges) et de l'arbre (valeur actuelle et potentielle, rôles sylvicoles). Le terme d'exploitabilité, défini en diamètre et non en âge, est certes un critère déterminant, mais il varie avec la station et la qualité des arbres.

A l'exception des peuplements en crise définis ci-dessus, il est possible de transformer progressivement des peuplements en futaie irrégulière mélangée qu'ils soient en taillis, futaie ou mélange taillis/futaie (AFI, 2009). Cette transformation peut être longue et il parait évident qu'elle ne sera pas terminée en 2050, mais notre stratégie prévoit d'étendre le processus en gardant la couverture forestière sur toutes les surfaces non considérées en impasse. Ainsi, les scénarios étudiés intègrent une « sylviculture continue » caractérisée par :

- L'abandon du régime du taillis simple, avec conversion par balivage de tous les taillis non jugés en impasse ; cet objectif peut paraitre très ambitieux, mais est atteignable avec une volonté politique forte car il représente 30 à 40.000 ha par an à baliver sur la période 2020-2050, par des coupes générant 50 à 100 m^3/ha soit annuellement au moins 2 Mm^3.
- Une composition n'excluant pas les essences « exotiques », mais contenant leur extension, visant partout le mélange d'essences et privilégiant les espèces de l'étage de végétation naturel, en gardant les essences « secondaires » à faible marché actuel (détail par essence plus bas) ;

Surfaces estimées en impasses réelles en 2019 :

Essence	S-tot	Mo	%S	S-imp	S-rebois	Conditions de dépérissement prioritaires (faible résistance climatique ou fortes pressions de pathogènes)
Chêne pédonculé	1661	0,30	8	133	80	Stations sèches (faible RU), sécheresses estivales, limite sud de l'aire, chenilles défoliatrices
Chêne rouvre	1382	0,15	5	69	41	Stations sèches (faible RU), sols battants, sécheresses estivales, limite sud de l'aire, chenilles défoliatrices
Hêtre	1016	0,15	6	61	37	Stations sèches (faible RU), basse altitude, sécheresses estivales, scolytes
Chêne pubescent	1009	0,30	5	50	30	Stations très sèches (faible RU), basse altitude, sécheresses estivales
Chêne vert	622	0,30	4	25	15	Sols très superficiels, basse altitude hors bord de mer
Châtaignier	519	1,95	12	62	37	Taillis sur vieilles souches non balivés, stations sèches, sols très acides, chancre, encre
Frêne	423	0,45	14	59	36	Peuplements à majorité frêne en secteur chalarose, faible RU ou canicule hors secteur chalarose
Charme	407	0,15	4	16	10	Stations sèches (faible RU), sécheresses estivales, limite sud de l'aire, sols secs
Pin maritime	805	0,30	4	32	26	Stations sèches (faible RU) et/ou très acides, processionnaires, rouilles
Pin sylvestre	640	0,75	6	38	31	Stations très sèches (faible RU) et/ou très acides, processionnaires, rouilles
Epicéa commun	445	0,75	12	53	43	Faible RU et basse altitude, sols secs et versants sud, canicules, sécheresses estivales, scolytes, fomès
Sapin pectiné	458	0,30	7	32	26	Faible RU, basse altitude, canicules, sécheresses estivales, stations, gui, dorge, chermès
Douglas	322	0,45	5	16	13	Faible RU et basse altitude dans le sud, canicules, sécheresses estivales, rouille, nécroses cambiales
Pins noirs (Alep et noirs)	275	0,45	5	14	11	Stations très sèches (faible RU), basse altitude en secteur méditerranéen, *Sphaeropsis*, maladie des bandes rouges
Feuillus sec. dont bouleau	1373	0,45	5	69	34	Stations sèches et/ou pauvres, pathogènes selon essence
Résineux sec. dont mélèze	316	0,45	4	13	6	Stations sèches et/ou pauvres, pathogènes selon essence
Non identifié	206	0,45	4	8	4	Stations sèches et/ou pauvres, pathogènes selon essence
Non recensables (D < 7,5 cm)	217	0,30	4	9	7	Stations sèches et/ou pauvres, pathogènes selon essence
Total	**12098**	**-**	**-**	**760**	**486**	**-**

Légende : S-tot = 75% des surfaces en France (en gestion) en kha ; M_0 = taux annuel de mortalité 2019 en % du volume sur pied (IFN ajusté, cfr III.6.3) ; %S = % de surface estimée en impasse en kha (voir texte) ; S-rebois : surface à reboiser en kha (voir texte) ; RU = réserve utile maximale en eau.

- Des coupes d'intensité modérées, minimisant les chocs sur les peuplements et maximisant l'évolution de la part de bois d'œuvre, en veillant à la juste rémunération de l'abattage et du débardage ;
- La définition d'un « volume bois fort tige par hectare d'équilibre », permettant le prélèvement et le renouvellement continu des peuplements (Pro Silva France, 2013) ;
- Une adaptation des taux de prélèvement pour évoluer vers ces volumes d'équilibre en 2050, ces taux moyens par essence variant selon la situation (fort ou faible capital initial) ;
- L'absence totale d'export des « menus bois » (D < 7 cm) et des souches ;
- Une récolte raisonnée du volume total des branches, à ajuster selon les essences pour garder leurs fonctions biologique (biodiversité) et fertilisante, avec un minimum pour permettre les travaux sylvicoles et d'exploitation ;
- Des termes d'exploitabilité élevés permettant la régénération naturelle (maturité sexuelle et du sol) et toutefois compatibles avec les outils de transformation actuellement disponibles ;
- La priorité à la régénération naturelle pour éviter la perte de couverture et bénéficier de la capitalisation génétique en qualité et en adaptation climatique (sélection sylvicole, épigénétique), en gardant toutefois la possibilité de planter en l'absence de régénération naturelle ou pour enrichir localement sans coupe rase étendue (essences de diversification ou d'adaptation climatique) ;
- Le maintien en forêt d'une partie du bois mort produit annuellement, pour créer des îlots naturels de sénescence et augmenter les volumes de bois mort en forêt, élément essentiel pour la biodiversité saproxylique (menacée), la fertilité des sols et à la régulation des pathogènes (résilience face au changement climatique).

3.4. Axe 2 : Préserver et augmenter les stocks dans les produits-bois

Toutes les stratégies françaises insistent sur le rôle des produits-bois dans l'atténuation du changement climatique (Roux et al., 2017 ; MAAF, 2018 ; MTES, 2018a). Le papier constituant un stock trop éphémère pour jouer un rôle d'atténuation, il sera traité avec le bois-énergie. Pour augmenter le stockage du carbone dans la **construction** de 2020 à 2050, on retiendra les mesures suivantes :

- Respecter la hiérarchie des usages (Pro Silva France, 2012a ; WWF, 2016) et favoriser les produits les plus durables : charpente traditionnelle et menuiserie pour les gros bois, bois massif reconstitué avec bois moyens pour les grandes portées, ossatures-bois pour les arbres de faible diamètre ; on note que selon le diagramme de filière présenté plus haut, palette et emballage (non durables) représentent 36% du bois scié.
- Développer les usages durables pour le bois d'industrie : OSB et MDF à colles sans formaldéhydes pour les bois de trituration, poteaux et piquets pour les petits bois à faible décroissance et nodosité.

Les résineux sciables seront valorisés jusqu'à fin bout 15 cm et tous les feuillus sciables seront valorisés en bois d'œuvre jusqu'à un diamètre fin bout 20 à 30 cm hors aubier selon l'essence, y compris le hêtre et le châtaignier et les bois blancs secondaires (bouleau, tremble, charme, tilleul) sans défauts rédhibitoires pour un usage structurel. Les durées de stockage des produits sont données au chapitre 4.

3.5. Axe 3 : Substituer par le bois et réduire les émissions de la filière

Si la substitution est largement détaillée dans les propositions actuelles en France, l'amélioration des coefficients de substitution par la réduction des « émissions amont » (exploitation-transports-transformations) semble attirer peu d'attention, alors que ces dernières décennies la dépense énergétique liée à la mobilisation des bois de la forêt au consommateur augmente avec la mécanisation et l'augmentation des transports. Pour augmenter l'effet bénéfique de la filière forêt-bois il faut minimiser les émissions au moyen :

- De travaux sylvicoles peu impactants : absence de dessouchage et de labour, respect de la diversité lors des dégagements et des dépressages, tonnages et pressions au sol limités ;
- Une mobilisation des bois limitant les transports occasionnés par la mise en vente, l'organisation du chantier, l'abattage et le débardage (entreprises régionales) ;
- L'abattage mécanisé réservé aux petits résineux peu branchus en faible pente (l'abattage mécanisé émet environ 5 fois plus de CO_2 par m^3 que l'abattage manuel, hors émissions générées par la fabrication, l'entretien et le recyclage des abatteuses) ;
- Un débardage peu impactant pour préserver le fonctionnement du sol et son stock de carbone ;
- La limitation de l'usage du bois-énergie aux projets à rendement élevé (chaleur + électricité) et approvisionnés localement ;
- Un sciage par des unités les plus proches possibles et des procédés économes en énergie.

Les gisements de bois utilisables pour un usage industriel (trituration papier/bâtiment, rondins et poteaux) ou énergétique (bûche, plaquettes, granulés) sont considérés comme interchangeables, du moins dans à l'échelle régionale. C'est pourquoi nous considérons un gisement unique de bois industrie / bois énergie (BIBE) pour lequel des arbitrages d'usages sont indispensables et seront étudiés au chapitre 5. Dans le cadre de cette étude, et en cohérence avec les hypothèses retenues, le gisement considéré comme soutenable de BIBE est constitué :

- Des bois d'éclaircies associés à une sylviculture visant les bois d'œuvre de qualité ;
- D'une partie des surbilles et des branches associées à la récolte des arbres arrivés à maturité, en excluant la récolte des menus bois (bois de diamètre inférieur à 7 cm).
- Des connexes produits par la transformation du bois (écorçage et délignage, sciage, fraisage …).

3.6. Les scénarios 2020-2050 étudiés

3.6.1. Base commune

Pour tous les scénarios, la forêt française est considérée exploitable à 75% en 2050 à partir d'un taux de gestion estimé à 65% en 2020 (§ 3.2), avec une évolution linéaire de ce taux entre 2020 et 2050 par efforts d'équipement et de regroupement. Ainsi 25% sont laissés en libre évolution jusque 2050, ce qui correspondant aux préconisations de Dooley et al. (2018), avec 10% légalement bloqués en 2050. La surface des forêts classées en impasse est de 3% en 2020 et évolue jusque 2050 selon un rythme fixé par le taux de mortalité retenu comme expliqué aux points 3.6.3 et 3.6.4.

Pour tous les scénarios, la gestion des trois situations-type est définie par les caractéristiques suivantes :

	Libre Evolution (LE)	**Sylviculture Continue (SC)**	**Impasses (Imp)**
Traitement(s)	Aucun	Evolution vers la futaie irrégulière mélangée (grain d'hétérogénéité selon la composition en essences)	Récolte du peuplement en place, puis futaie régulière jusque 2050 (jeunes plantations)
Evolution de la composition*	Libre	Maintien de la diversité, mélange favorisé – détail au chapitre 4	Renouvellement avec de nouvelles essences – détail au chapitre 4
Nature des coupes	Sans	Eclaircies seulement, avec des trouées d'étendue adaptée à l'essence	Coupes rases par parquets de 2 ha maximum

** L'évolution prévue de la part respective des essences est détaillée au chapitre 4.*
En croissance : chênes sessile, pubescent et vert, pins maritime, sylvestre et noirs, douglas, mélèze d'Europe, cèdre, feuillus secondaires et essences méditerranéennes
En diminution : chêne pédonculé, hêtre, châtaignier, frêne, charme, épicéas, sapin pectiné.

Dans tous les scénarios climatiques pour la France, jusqu'au moins 2035 la fertilisation par la hausse de la concentration du CO_2 atmosphérique devrait compenser les effets dépressifs des hausses de température, ce qui devrait maintenir la production brute actuelle (Colin & Thivolle-Cazat, 2016). Comme les scénarios climatiques du GIEC (2018) ne différent significativement qu'après 2050, nous avons supposé la production biologique constante entre 2020 et 2050 pour toutes les essences, sauf en Impasses où elle est logiquement proportionnelle à la surface foliaire résiduelle. Il est possible que le scénario climatique RCP 8.5 réduise déjà les productions brutes avant 2050, mais simuler cet effet semble très hasardeux et l'évolution des taux de mortalité retenue (cfr § 3.6.3) devrait les l'intégrer.

Libre évolution (LE)

La première situation est la forêt sans aucun prélèvement de bois. Cette situation ne nécessite pas de définition technique, en-dehors des choix d'orientation fixés dans le rapport principal. La distribution des surfaces entre les essences a été choisie selon quatre critères : valeur économique des bois sur pied, accessibilité (coûts de création de l'accès et d'exploitation), adaptation essence-station (pour réduire le risque de mortalité accélérée), intérêt écologique des écosystèmes correspondants dont la part de gros et très gros bois (intérêt carbone et biodiversité). Elle est donnée dans le tableau des itinéraires ci-après.

Etant donné qu'un tiers des surfaces en libre évolution se situe en terrain difficile à exploiter donc probablement sur des sols relativement superficiels, et qu'il existe des peuplements similaires à ceux classés en « impasse » (terme dénué de sens pour la libre évolution), pour cette modalité nous avons appliqué une décote forfaitaire de 5% sur la production brute IFN de chaque type de peuplement.

Sylviculture continue (SC)

La seconde situation est la forêt gérée, à laquelle nous appliquerons la sylviculture continue définie dans le rapport au point 3.3.3. Celle-ci doit néanmoins être adaptée dans la troisième situation (impasses), détaillée ci-dessous.

Le tableau ci-dessous, résumant les paramètres fixés par essence en SC, a été établi comme suit :

1) La **composition** évolue selon le tableau ci-dessous, en réaction aux évolutions sanitaires prévisibles dans le scénario climatique choisi, soit par rapport aux surfaces 2019 :

Perte > 10% pour : frêne, épicéa, châtaignier, chêne pédonculé et sapin pectiné (–11%) ;
Gain > 10% pour : chêne sessile, pubescent et vert, pins noirs et douglas (+11%) ;
Evolution entre -10 et +10% pour les autres essences.
Ces évolutions gardent le rapport actuel entre feuillus et résineux.

2) Les **termes d'exploitabilité** sont choisis élevés pour permettre la régénération naturelle (maturité sexuelle et du sol), en limitant toutefois les risques de dépérissement et en restant compatibles avec les outils de transformation actuellement disponibles (Chalayer, 2019).

3) Les **volume/ha à l'équilibre en forêts gérées** en Sylviculture Continue (en m^3/ha bois fort tige) correspondent à l'équilibre de l'essence principale en futaie irrégulière (toutes classes de diamètre mélangées), estimés à partir des normes de surface terrière du réseau Pro Silva (Pro Silva France, 2013), en tenant compte des termes d'exploitabilité fixés, ce qui donne entre 92 (chêne vert) et 406 m^3/ha (douglas). Ces niveaux ne sont toutefois pas absolus car ils dépendent des stations. Pour la France le niveau moyen d'équilibre se situerait ainsi autour de **205 m^3/ha**.

4) **Rotation moyenne** : 5 à 15 ans selon l'essence et la station (accroissement), compromis entre dérangement de la canopée et dérangement du sol.

5) **Taux annuel de prélèvement** de la production nette : il est établi pour chaque scénario et chaque essence selon les principes définis au § 3.6.2.

6) Le bois mort issu de la **mortalité naturelle** est récolté selon un taux lié au scénario de gestion (cfr chapitre 3) avec un minimum de 10% pour des raisons de sécurité (bords de voies de circulations et de zones habitées) et de circulation pour les travaux de sylviculture et d'exploitation ; ainsi jusque 90% du bois mort naturellement se décompose lentement en forêt et génère ainsi des îlots de sénescence essentiels pour la biodiversité.

7) Les **branches** des arbres abattus sont récoltées selon un taux dépendant du scénario de gestion (cfr chapitre 3), avec un minimum de 20% pour permettre le travail forestier et un maximum de 75% considéré comme le maximum techniquement réalisable avec un coût économique réaliste (50 à 90% selon pente et essence).

8) Pour le **renouvellement**, la priorité est donnée à la régénération naturelle en préservant au maximum la couverture forestière (justifications dans le scénario), avec des modalités adaptées au comportement de chaque essence (héliophile, sciaphile, lumière verticale ou latérale, germination et croissance initiale, compétition).

9) Enfin, nous avons considéré que les parts de **bois d'œuvre** dans le bois fort tige donné par l'IFN pour chaque essence (2019) restent constants jusque 2050 (option prudente), car si les diamètres et qualités seront amenés à progresser, les éclaircies d'amélioration strictes de ce scénario préservent les gros bois de qualité et les bois moyens d'avenir.

Evolution des types de peuplements par essence principale en sylviculture continue :

Essence principale (% ha)	IFN 2019	Objectif 2050	Evolution
Chêne pédonculé	12,9	10,8	Maintien du chêne en favorisant le sessile et en gardant les essences secondaires, plantations localisées de diversification
Chêne rouvre	10,8	12,7	Chêne sessile et essences secondaires favorisés par rapport au chêne pédonculé
Hêtre	9,0	8,2	Maintien du hêtre en favorisant le chêne sessile et les essences secondaires, éclaircies avec critère sanitaire fort
Chêne pubescent	9,0	10,0	Maintien du chêne pubescent avec les essences secondaires, évolution naturelle à sa faveur
Chêne vert	4,8	5,7	Maintien du chêne vert avec les essences secondaires, évolution naturelle à sa faveur
Châtaignier	4,6	4,0	Maintien du châtaignier en mélange, balivage des taillis pour favoriser les autres essences (chêne sessile, chêne pubescent, pins …)
Frêne	4,1	3,3	Maintien du frêne en mélange en favorisant les autres essences, à détourer fortement si chalarose (chênes, merisier, érables …)
Charme	3,5	3,2	Maintien du charme en mélange avec les autres essences
Pin maritime	6,5	7,1	Développement du pin maritime en favorisant le mélange (chênes sessile et pubescent, bouleau, sorbiers, autres pins …)
Pin sylvestre	5,5	5,8	Maintien du pin sylvestre en favorisant le mélange (chênes sessile et pubescent, sorbiers, érables, bouleau, sapins …)
Epicéa commun	3,9	3,1	Maintien de l'épicéa en mélange (sapin, douglas, hêtre, chêne sessile, pins, érables …) et en travaillant pour la régénération
Sapin pectiné	3,6	3,2	Maintien du sapin en favorisant le mélange (hêtre, douglas, chênes sessile, pin sylvestre, érables, bouleau, sorbier …)
Douglas	2,5	2,8	Maintien du douglas en favorisant le mélange (hêtre, sapin, chênes sessile, pin sylvestre, érables, merisier …)
Pins noirs (A&L)	2,4	2,7	Maintien des pins noirs en favorisant le mélange (chêne pubescent, pin sylvestre, cèdre, cormier …)
Fu secondaires dont bouleau	10,7	11,0	Maintien de ces essences en mélanges dans les autres peuplements
Rx secondaires dont mélèze et cèdre	2,8	3,0	Maintien de ces essences en mélanges dans les autres peuplements, mélange favorisé dans les plantations de mélèze
Non identifié	1,7	1,7	Maintien de ces essences en mélanges dans les autres peuplements
Non recensables (D < 7,5 cm)	1,7	1,7	Maintien des essences plantées en gardant les essences d'accompagnement lors des dégagements, dépressages et éclaircies
Total	**100,0%**	**100,0%**	

Le tableau en page suivante donne les surfaces (kha) par situation de gestion pour chaque essence principale, ainsi que les termes d'exploitabilité moyens, les surfaces terrières et volumes d'équilibre et les modes de renouvellement prévus.

Surfaces par situation par essence principale, capital d'équilibre estimé et modes de renouvellement en sylviculture continue

Essence principale	Tot.	LE	SC	Imp.	TEm	Ge	Ve	Mode de renouvellement
Chêne pédonculé	2078	417	1587	80	90	16	188	Régénération naturelle par coupes progressives sur parquets < 2 ha, plantations localisées de diversification
Chêne sessile	1737	355	1351	41	90	17	203	Régénération naturelle par coupes progressives sur parquets < 2 ha
Hêtre	1444	428	984	37	70	22	230	Régénération naturelle par pieds et bouquets (< 0,5 ha)
Chêne pubescent	1443	434	970	30	50	17	117	Régénération naturelle par coupes progressives sur parquets < 2 ha
Chêne vert	769	147	605	15	40	15	86	Régénération naturelle par pieds et bouquets (< 0,5 ha)
Châtaignier	746	227	472	37	50	22	170	Régénération naturelle d'essences mélangées par pieds et bouquets (< 0,5 ha), par trouées et sous le couvert en cas de balivage
Frêne	652	229	370	36	60	19	202	Régénération naturelle d'essences mélangées par pieds et bouquets (< 0,5 ha), plantations localisées de diversification
Charme	559	152	401	10	50	25	196	Régénération naturelle d'essences mélangées par pieds et bouquets (< 0,5 ha)
Pin maritime	1050	245	786	26	60	24	240	Régénération naturelle par coupes progr. sur parquets < 2 ha, localement avec plantation sous couvert (cèdre, sapin Nordmann, érables …)
Pin sylvestre	891	251	612	31	60	24	221	Régénération naturelle par coupes progr. sur parquets < 2 ha, localement avec plantation sous couvert (cèdre, sapin Nordmann, érables …)
Epicéa commun	622	177	398	43	60	28	321	Régénération naturelle des essences adaptées, plantations de diversification par bouquets (< 0,5 ha sauf nette évolution vers impasses)
Sapin pectiné	572	114	433	26	70	30	354	Régénération naturelle par pieds ou bouquets (< 0,5 ha), diversification par cellules ou « nids » (hêtre, érable, douglas, cèdre …)
Douglas	404	82	309	13	70	32	406	Régénération naturelle par bouquets et par bandes, plantation de cellules de diversification (hêtre, sapin, pins, cèdre, érables…)
Pins noirs (A&L)	378	103	258	11	70	24	232	Régénération naturelle par coupes progr. sur parquets < 2 ha, localement avec plantation sous couvert (cèdre, sapin Nordmann, érables …)
Feu secondaires	1724	351	1350	34	50	24	171	Renouvellement avec le peuplement principal
Rx sec. dont MZ	448	132	310	6	70	25	250	Itinéraires ci-dessus selon l'essence (mélèze ≠ cèdre ≠ autres).
Non identifié	273	67	202	4	50	25	173	Renouvellement avec le peuplement principal
Non rec. (D < 7,5 cm)	280	63	214	7	60	26	247	Non concerné (jeunes peuplements), éclaircies dans un esprit de sylviculture continue (critères vitalité-qualité-diversité et non diamètre)
Total	**16 070**	**3 972**	**11 611**	**486**				

Surfaces totales en 1000 Ha : LE = libre évolution en 2050 ; Imp = impasse en 2020 ; SC = sylviculture continue (forêts gérées – impasses en 2020) ; TEm = terme d'exploitabilité moyen en cm = classe de diamètre à partir de laquelle tous les arbres sont exploités (sauf ceux en libre évolution), à adapter selon la qualité, le potentiel de la station et la santé des arbres ; Ge = surface terrière à l'équilibre en sylviculture continue en m^2/ha ; Ve = volume bois fort tige moyen à l'équilibre en sylviculture continue, en m^3/ha bois fort tige (Pour avoir le volume avec les branches : Ve × 1,3 à 1,7 selon essence).

Impasses (Imp)

En appliquant la définition donnée au § 2.3.2, pour 2019 nous avons estimé que 3% de la forêt française est **aujourd'hui** considérée en situation d'impasse et devra donc être renouvelée par plantation entre 2020 et 2050. Nous posons comme hypothèse le plan de reboisement ci-dessous (avec mélanges d'essences possibles). Dans nos scénarios, ce taux actuel est supposé croître selon un rythme lié au taux de mortalité (climat RCP 2.6 ou aggravé) et défini au § 3.6.3. La ventilation des surfaces par essence est supposée constante entre 2020 et 2050.

Essence	Ha	Chse	Chpu	Chve	FU	PIN	CEA	DOU	MZE	ESM	Total
Chêne pédonculé	80	40	20		20	20					100
Chêne rouvre	41		40		10	30	20				100
Hêtre	37	30	20		20	20	10				100
Chêne pubescent	30			20		20	40			20	100
Chêne vert	15	Evolution spontanée (pin d'Alep, garrigue ou maquis…) et pastoralisme									
Châtaignier	37		30			30	30			10	100
Frêne	36	60			30	10					100
Charme	10	50	10		20	20					100
Pin maritime	26	10	30		10	30				20	100
Pin sylvestre	31	10	30		10	30				20	100
Epicéa commun	43	10			10	20	20	20	20		100
Sapin pectiné	26	20			20	10	20	20	10		100
Douglas	13	20			10	20	30		10	10	100
Pins noirs (A&L)	11		30	10	10	30				20	100
Feu secondaires	34	20			40	30				10	100
Rx secondaires dont MZ	6				10	20	20	20	20	10	100
Non identifié	4				100						100
Non recensables (D < 7,5 cm)	7	10			10	40	10	20	10		100
Total en 2020 (kha)	**486**	**94**	**72**	**7**	**77**	**107**	**55**	**16**	**14**	**29**	**471**
		Feuillus = 250 kha = 53%				**Résineux = 221 kha = 47%**					

Code des essences :
** FU = autres feuillus (selon station) = châtaignier, hêtre, érables sycomore et plane, merisier, tilleul, peupliers …*
** PIN = pins (autre que l'essence d'origine) : maritime, sylvestre et noirs (dont Salzman), selon la station.*
** ESM = essences méridionales : feuillus et résineux en expérimentés dans le programme Life-FORECCAsT CNPF/IDF (http://www.foreccast.eu).*

Le stock de bois sur pied généré entre 2020 et 2050 par les nouvelles plantations sur ces surfaces en impasse a été estimé à partir des tables de production de chaque essence, sans éclaircie (peuplements trop jeunes) donc sans récolte.

3.6.2. Niveaux de prélèvements

Pour les surfaces classées en Impasses, le prélèvement bois fort tige annuel est exprimé en % du volume sur écorce sur pied par hectare. Entre 2020 et 2050, ce taux de prélèvement augmente avec la croissance du taux de mortalité selon un facteur a supérieur à 1 ($Rft_n = a \times Rft_{n-1}$) et est calibré de manière à atteindre un volume bois fort tige nul en 2050. En 2050 le « stock » d'impasses de 2020 est donc reboisé ; si la part nationale d'impasses continue à croitre, il restera alors un « flux » d'impasse à traiter annuellement. En parallèle, le peuplement suivant issu de plantation évolue selon les surfaces reboisées et une production par hectare croissante atteignant en 2050 un niveau directement lié aux essences plantées définies ci-dessus. Le taux moyen de récolte des branches et de la mortalité est fixé pour toutes les essences à 75% du volume sur pied et de la production, pour permettre la plantation dans des conditions réalistes.

Pour les peuplements classés en Sylviculture Continue, le taux de prélèvement annuel est exprimé en % de la production nette par hectare. Pour tester le modèle de calcul et comparer des scénarios de contrastés, nous

étudions 3 modalités de prélèvement sur ces surfaces, depuis une priorité donnée à l'écosystème jusqu'à une priorité donnée à la filière et aux besoins de la société, avec un scénario de compromis. Les niveaux moyens de récolte des branches et du bois mort ont été choisis à partir d'une estimation du minimum permettant de travailler en sécurité (10-20%), et du maximum techniquement réalisable compte-tenu du coût d'exploitation des branches sur pentes et avec des débardages longs, estimé à 75% (feuillus : 70% en montagne, 90% en plaine ; résineux : 30% en montagne, 70% en plaine). Pour tous les scénarios avec prélèvement, on part d'une récolte totale en 2020 de 60 Mm^3 (niveau actuel), et le niveau de récolte bois fort tige résulte des objectifs fixés dans le scénario. L'évolution des stocks et des flux est alors estimée à partir d'un calculateur « PRM » (production-récolte-mortalité) et de paramètres étudiés et fixés de manière transparente, décrits au chapitre 4.

Scénario	Objectif général	Taux de récolte résultants
Ecos	Atteindre les volumes d'équilibre * en 2050 avec des prélèvements de branches et de bois mort les plus bas possibles (priorité stocks, fertilité et biodiversité).	Branches : taux fixe de 20% de la coupe ; Bois mort : taux fixe de 10% de la mortalité ; Bois fort tige vivant : taux variable calculé pour atteindre le volume d'équilibre en 2050 par une évolution linéaire depuis 2020 (sans objectif de prélèvement global).
R60	S'approcher des volumes d'équilibre avec un prélèvement global stable de 60 Mm^3/an entre 2020 et 2050 et une récolte modérée des branches et du bois mort (scénario de compromis).	Branches : taux fixe de 50% de la coupe ; Bois mort : taux fixe de 20% de la mortalité ; Bois fort tige vivant : taux variable calculé pour prélever 60 Mm^3/an de 2020 à 2050.
R95	Récolter le maximum techniquement réalisable de branches et de bois mort pour atteindre un prélèvement global de 95 Mm^3/an en 2050 (priorité économie).	Branches : taux fixe de 75 % de la coupe ; Bois mort : taux fixe de 75% de la mortalité ; Bois fort tige vivant : taux variable calculé pour obtenir une évolution linéaire du prélèvement total de 60 Mm^3 en 2020 à 95 Mm^3/an en 2050.

** Les volumes d'équilibre bois fort tige en m^3/ha) retenus sont donnés au § 3.6.1.*

Le bilan du prélèvement des systèmes racinaires est très défavorable donc sera exclu de tous les scénarios (dépense énergétique, perte de carbone, déstructuration du sol et de ses fonctions biologiques et hydriques …).

Pour chaque scénario, on simule d'abord l'évolution globale des stocks et des récoltes à partir de paramètres moyens pour la forêt française, donnés par l'IFN ou calculé à partir des paramètres de chaque essence (chapitre 4) et de la représentation de cette essence en volume sur pied dans la forêt française entre 2020 et 2050, considérant l'évolution prévue dans le scénario.

Ensuite, pour établir l'évolution des stocks et les récoltes de chaque essence, on applique le même modèle de calcul pour chaque essence avec ses paramètres propres (chapitre 4) et avec la même courbe de prélèvement 2020-2050, calibrée par un taux moyen 2020-2050 permettant de ventiler la récolte globale en fonction de l'écart entre volume/ha actuel et à l'équilibre mais aussi des crises sanitaires actuelles avérée ; seules les essences en crise sanitaire ont un taux dépassant 100%.

En sommant les résultats obtenus, on vérifie alors que le total calculé par cette entrée « essences » correspond aux valeurs obtenues par l'entrée « forêt française » et on peut si nécessaire revenir sur le taux moyen de prélèvement de chaque essence.

Les deux démarches permettent ainsi de distinguer deux éléments de choix : la stratégie globale pour la France et la manière dont elle se décline par essence. La réalisation de simulations à l'échelle régionale permettrait de définir à une échelle plus pertinente les volume/ha d'équilibre et les termes d'exploitabilité de chaque essence. Ainsi la démarche pourrait permettre de confronter la stratégie nationale (démarche descendante) avec l'addition de stratégies régionales (démarche ascendante), pour parvenir à une coordination entre les deux.

En revanche, le protocole retenu ne permet pas de simuler les prélèvements par diamètres, ce qui entraine en potentiel une marge d'erreur assez importante sur les produits générés. Dans une sylviculture de type SICPN

(couverture continue), répartir les prélèvements par diamètres est délicat car la coupe n'est pas déclenchée par un terme d'exploitabilité appliqué à l'échelle de la parcelle comme expliqué dans la définition de la sylviculture continue au § 3.3.3.

3.6.3. Taux de mortalité

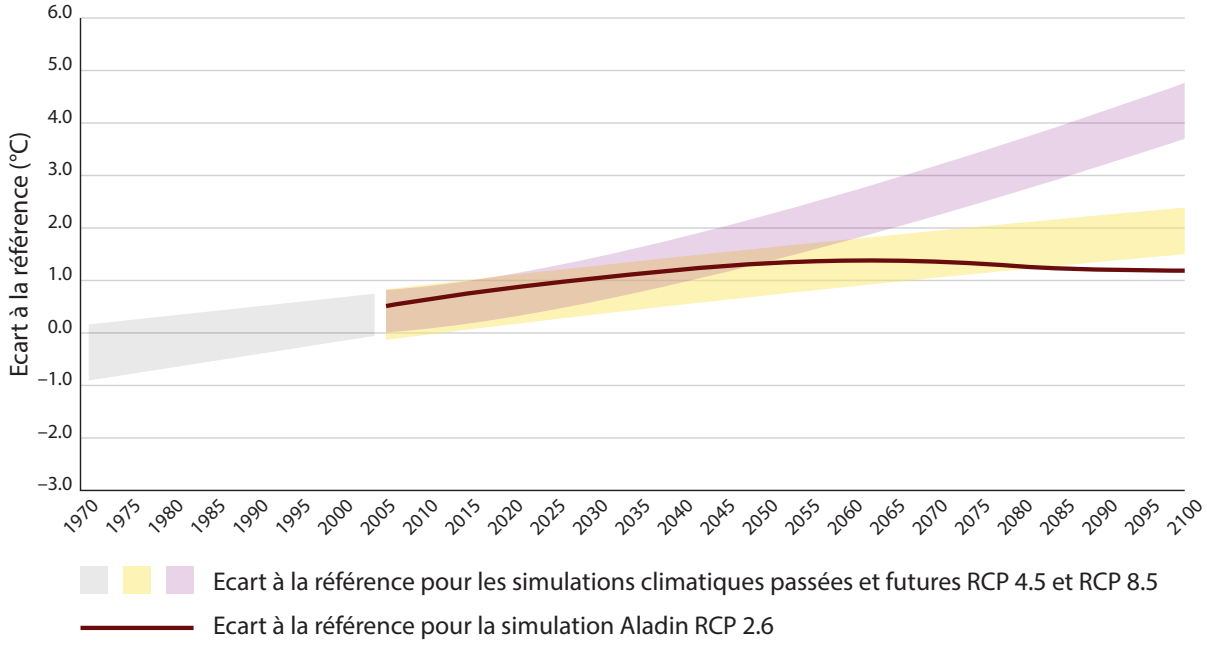
La mortalité des arbres dépend de nombreux facteurs, dont les caractères du climat et de la gestion appliquée au peuplement (cfr chapitre 2). Elle influence fortement l'évolution des stocks de biomasse vivante, comme celle de la biomasse morte selon la vitesse de décomposition du bois mort. (cfr chapitre 4). Son évolution entre 2020 et 2050 pourrait modifier les résultats de scénarios de gestion (Roux et al., 2017).

Le taux de mortalité est exprimé en % du volume sur pied. Il donne un rythme de renouvellement du capital, donc est l'inverse de la durée moyenne de vie des arbres. Le taux moyen donné par l'IFN (2019) de 0,3% par an correspond à une durée moyenne de vie des arbres de 333 ans. S'il reste constant et que le taux de prélèvement est faible, il mènerait à long terme à des volumes par hectare très élevés (cfr chapitre 4). Ce taux de mortalité exprime la jeunesse des arbres de la forêt française, mais est très certainement faussé par la sylviculture actuelle, dont une des caractéristiques majeures est de prélever les arbres avant leur mortalité et de récolter la plupart des arbres morts (donc non observés par l'IFN). De plus, les chiffres IFN sont basés sur des campagnes d'observation 2013-2017 alors que ces dernières années les mortalités sont accrues, par exemple en épicéa (Mélières & Riou-Nivert, 2019). Les taux actuels réels doivent donc être augmentés. Les surfaces classées en Libre Evolution étant en majorité déjà non exploitées aujourd'hui, nous augmenterons plus le taux de mortalité initial pour cette modalité. Pour toutes les essences, nous appliquons forfaitairement un facteur 1,5 en Sylviculture Continue, de 2,0 en Libre Evolution et de 4,0 en Impasses. Il s'agit bien d'hypothèses communes à tous les scénarios étudiés et qui peuvent faire l'objet d'une révision.

Dans un peuplement non encore mature, la mortalité évolue selon une exponentielle témoignant la compétition croissante entre tiges, pour se stabiliser une fois le peuplement « mature ». Avec la croissance du volume sur pied, un taux de mortalité en volume sur pied constant intègrerait les effets de la compétition, mais pas ceux des variations de pression des agents abiotiques (climat) et biotiques (pathogènes).

Cette étude se concentre sur la période 2020-2050, où les évolutions possibles de la température moyenne sont peu contrastées (diagramme ci-dessous, © Météo-France), de même que les effets probables de ces évolution sur les écosystèmes terrestres (GIEC, 2018).

Température moyenne annuelle en France métropolitaine : écart à la référence 1976-2005
Simulations climatiques sur passé et futur pour trois scénarios d'évolution RCP 2.6, 4.5 et 8.5



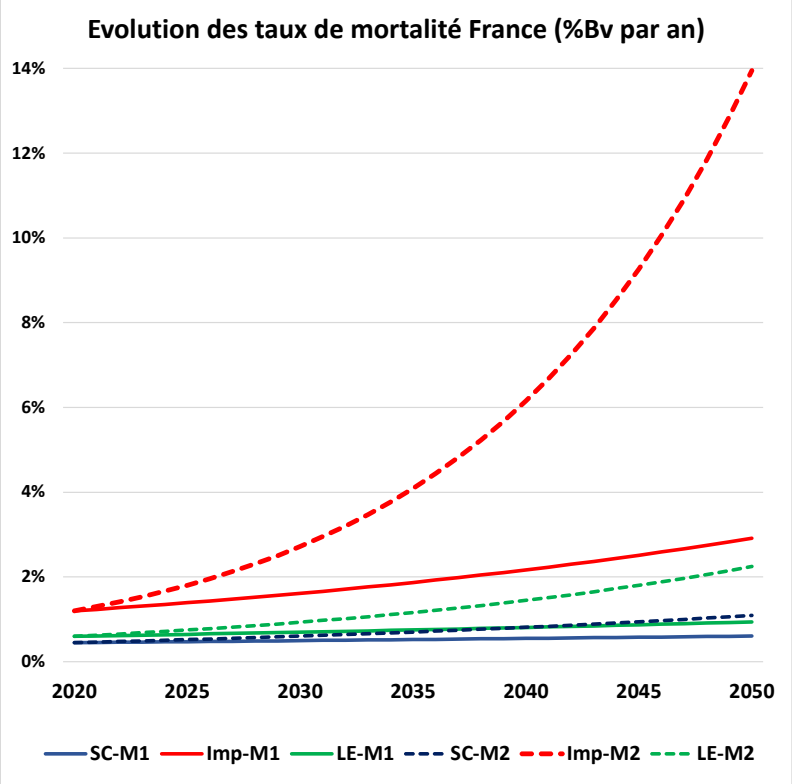
Malgré les sécheresses 2003-2005 et 2015-2017, le « thermomètre sanitaire DSF » 1998-2017 (DSF, 2018) ne montre pas de tendance générale à la hausse des principaux dégâts d'origine biotique et abiotique. Toutefois, depuis 2015 l'évolution semble préoccupante, avec un gain planétaire moyen de 0,2°C entre 2015 et 2018 (WMO, 2019). Même dans le scénario climatique RCP 2.6, entre 2020 et 2050 on devrait connaître une hausse de la fréquence des épisodes de sécheresse et de canicules (GIEC, 2018 ; Mélières & Riou-Nivert, 2019), augmentant aussi la pression des pathogènes (Mélières & Riou-Nivert, 2019) et entrainant ainsi une hausse des mortalités.

Concrètement, simuler l'effet de l'évolution climatique sur les arbres nécessiterait un modèle écophysiologique complexe et aux paramètres multiples, hors des moyens alloués à cette étude. Nous utilisons la fonction exponentielle décrite plus haut pour la compétition pour intégrer la hausse graduelle de la probabilité des épisodes de sécheresse et de canicule produisant des mortalités. On pose ainsi l'hypothèse que le taux de mortalité évolue selon un coefficient multiplicateur « a » supérieur à 1 comme suit : $M_n = a \times M_{n-1}$. Cette expression donne une évolution exponentielle de M exprimant la rétroactivité des effets climat-peuplement, donc il est évident qu'elle ne peut s'appliquer qu'à une courte période. Si la température se stabilise en 2050 (scénario 2.6 ci-dessus), le taux devrait se stabiliser également.

Nous définissons ainsi deux niveaux d'évolution de la mortalité (M1 et M2) par un facteur « a », les variations entre essences étant exprimées par le taux de mortalité initial et la part de surface en situation d'impasse. L'évolution forte (M2) pourrait correspondre au scénario climatique aggravé RCP 8.5. Pour les surfaces en impasse, l'évolution des mortalités entraine une hausse des surfaces en impasse entre 2020 et 2050 comme expliqué en § 3.6.4 ci-dessous.

Paramètre 2020-2050		**Libre Evolution (LE)**	**Sylviculture Continue (SC)**	**Impasses (Imp)**
Mortalité initiale		Taux IFN (2019) × 2,0	Taux IFN (2019) × 1,5	IFN (2019) × 4,0
Evolution du taux de mortalité	**M1**	+1,5% par an (a = 1,015)	+1,0% par an (a = 1,010)	+3,0% par an (a = 1,030)
	M2	+4,5% par an (a = 1,045)	+3,0% par an (a = 1,030)	+9,0% par an (a =1,090)
Part d'Impasses		2020 = 4,5% des forêts gérées ; 2050 = 5,0% en M1, 9,0% en M2.		

Le calcul selon ce tableau donne les évolutions suivantes :

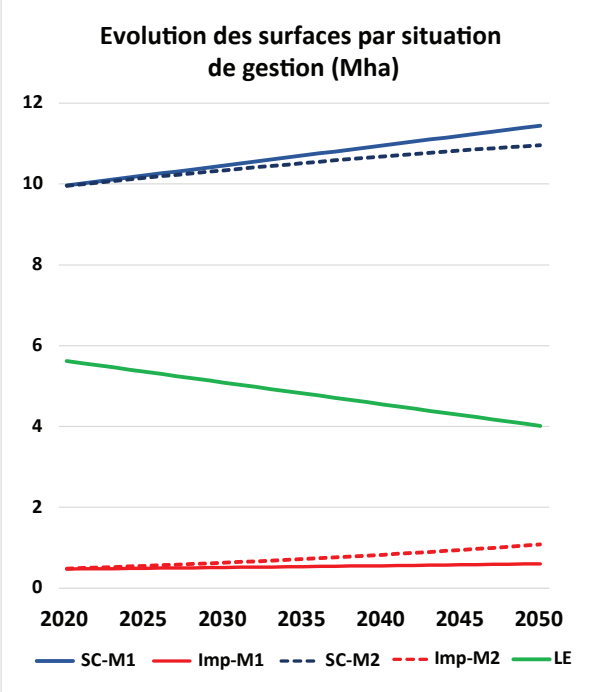


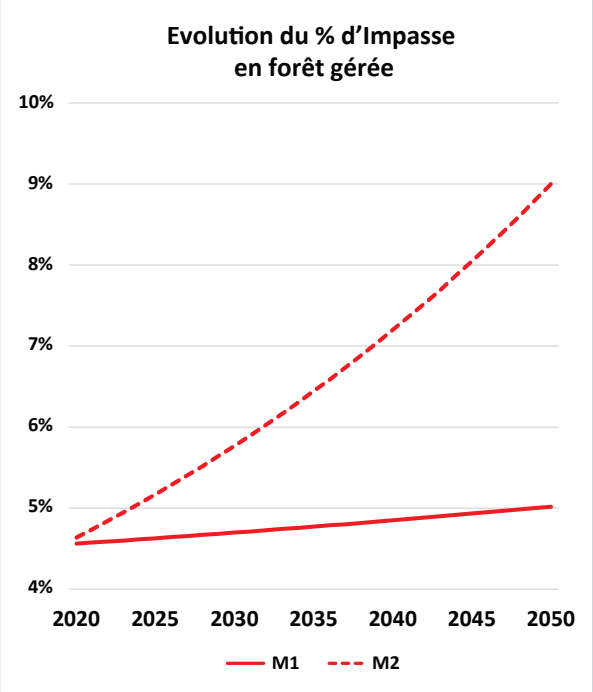
Cette hypothèse de croissance générale des taux de mortalité s'appuie sur l'idée qu'indépendamment des évolutions climatiques, la forêt française, dans l'ensemble assez jeune, entre aujourd'hui dans la phase de forte compétition du cycle sylvigénétique caractérisé par une hausse des taux de mortalité. Le scénario climatique aggravé de type RCP 8.5 fait ensuite la différence entre les modalités M1 et M2, avec des taux de mortalité élevés en 2050, surtout en Impasses caractérisées par un état sanitaire déjà critique en 2020.

3.6.4. Evolution des surfaces par situation de gestion

Pour pouvoir calculer les taux de prélèvements correspondant aux scénarios, il est nécessaire de calculer la surface concernée par situation de gestion depuis la situation actuelle jusqu'en 2050. Comme expliqué au chapitre 3.2, nous avons fait évoluer de manière linéaire la surface en gestion active depuis 65% (niveau actuel estimé) à 75% (niveau 2050 simulé), le reste de la surface étant en libre évolution (sans prélèvement) soit de 35% en 2020 à 25% en 2050.

Selon le paragraphe 3.3.2, en 2020 les surfaces estimées en impasses gérables concernent 0,47 Mha soit 3,0% de la forêt française et 4,5% de la forêt gérée. Nous avons choisi des surfaces en impasse identique pour les trois scénarios de prélèvements afin de tester l'effet des taux de prélèvement sans effet des autres variables. Avec les épisodes de sécheresse et de canicule, la part d'impasses devrait augmenter, légèrement en modalité M1 et fortement en modalité M2. On suppose dans les deux cas une évolution exponentielle liée au taux de mortalité, qui atteindrait en 2050 les niveaux de 5% avec M1 (4% de la forêt française) et de 9% avec M2 (7%), ce qui donne les diagrammes ci-dessous.





La courbe en vert du diagramme de gauche indique les surfaces non concernées par des prélèvements réguliers ; en 2020 le terme « libre évolution » concerne donc une situation de fait et pas nécessairement un statut légal ou une décision de gestion. En revanche, la surface ce type en 2050 soit 25% de la forêt française, est un choix stratégique relevant du scénario de gestion comme expliqué en 3.6.1.

La forte évolution de la part d'impasses en M2 est le signe direct de l'évolution rapide du taux de mortalité.

Cette évolution des surfaces entre dans le calcul des stocks totaux pour la forêt française.

4. METHODOLOGIE DE CALCUL

4.1. Contexte, périmètre et données de base

L'étude est réalisée sur une surface constante de 16,07 Mha, correspondant à la forêt de France métropolitaine en 2018, Corse et peupliers compris.

L'objectif étant de respecter le cap de la COP21 et les trajectoires climatiques du GIEC différent surtout après 2050, cette étude prend pour hypothèse le scénario climatique RCP 2.6, caractérisé par un impact modéré sur les écosystèmes terrestres (GIEC, 2018). Prédire le rôle de la forêt au-delà de 2050 est particulièrement hasardeux. Cependant, étant donné le risque d'emballement climatique au-delà de 2050 si les efforts nécessaires ne sont pas faits, nous simulerons aussi les effets de taux de mortalité supérieurs associés à une évolution climatique du type RCP 8.5.

Pour étudier l'incidence de scénarios de gestion sur les flux de carbone, le plus adapté serait de modéliser l'évolution des forêts et des produits par type de peuplement, élément physique de base intégrant les dimensions écologiques (biotope et dynamique) et historiques (impacts du passé et gestion actuelle et future). Pour produire et étudier librement ces scénarios, l'idéal serait de pouvoir simuler les évolutions de ces peuplements et de leurs produits au moyen d'un calculateur Carbone national complet, alimenté par des données fiables et complètes sur la consistance et la dynamique des écosystèmes forestiers par grand couple station/peuplement. Le niveau le plus fin de ce couple serait (1) pour la station, la sylvo-écorégion avec un sous-découpage altitudinal, géologique et topographique (2) pour le peuplement, des unités définies par la combinaison des critères régime, composition et structure (donc diamètres/âges). Cette approche permettrait d'intégrer des liens fonctionnels entre espèces qui pourraient favoriser la résilience des forêts, donc être déterminants à l'avenir comme expliqué au chapitre 2. Cependant, cet idéal a dû être adapté aux réalités comme expliqué ci-dessous.

Nous avons travaillé avec les données issues des inventaires IFN, soit 33 000 placettes pour la France métropolitaine. Toutefois, obtenir à partir de ces données brutes une base de données complète, unifiée et fiable correspondant aux besoins de l'étude aurait demandé un important travail de spécialiste, non envisageable dans les délais et budgets alloués. Nous avons donc choisi de travailler à partir de données IFN publiées depuis 2014 et d'extractions 2019 en mode « expert » sur le site IFN. Toutefois ces données n'offrent souvent pas les croisements et superpositions nécessaires (ex. structure par type de composition pour une Grande Région Ecologique IFN = Greco). De plus il apparait parfois des différences entre synthèses par Greco et synthèses nationales. Il a donc fallu chercher un compromis entre « homogénéité des unités physiques » utilisés comme base de calcul d'une part, et disponibilité et fiabilité des données sur ces unités de l'autre. Les chiffres nationaux ont finalement été choisis pour leur plus grande stabilité, en rassemblant les variables adaptées avec leur intervalle de confiance. Pour constituer la base de données, nous avons rapproché les données issues de plusieurs rapports IFN et d'extractions ciblées.

Du fait de la diversité des faciès possibles, il n'existe pas à l'échelle nationale de type synthétique intégrant l'origine, la structure et la composition des peuplements comme écosystèmes (habitats) ; le seul critère « composition » est déjà représenté par 40 modalités, qui pourtant ne font pas certaines distinctions essentielles comme par exemple entre les chênes autres que le sessile et pédonculé, pour lesquelles beaucoup de variables seraient difficile à obtenir de manière fiable. De plus, travailler à partir de types de peuplements rendrait le calcul des produits récoltés très complexes.

Donc même si l'approche se voulait basée sur l'écologie des écosystèmes et non l'auto-écologie, il est apparu incontournable de baser nos estimations sur les données par peuplement défini par son essence principale, rapportées à l'hectare le cas échéant. Ce choix permet de rassembler les informations essentielles de différentes sources IFN (surfaces et volumes, diamètres, production et mortalité, prélèvements, produits …).

Les données principales concernent les arbres dits « recensables » (D > 7,5 cm). Toute placette est classée en « peuplement recensable » dès lors que la strate recensable couvre au moins 10%. En conséquence cette catégorie peut comporter des peuplements clairs en régénération (ex. chênaies en coupes secondaires). Aux lignes par essence, il a fallu rajouter une ligne de « types non recensables », constituée de surfaces dont les arbres ne dépassent pas 7,5 cm de diamètre, soit 280 000 ha de plantations de moins de 5 ans (63%), 5 à 10 ans (34%) et 10 à 15 ans (3%), selon l'essence.

A la différence des habitudes prises par l'IGN, nous avons choisi de prendre les pins noirs à part et non en « Résineux divers », car ils pourraient constituer une ressource d'avenir importante et occupent ensemble 2,4% de la forêt française en surface soit presque autant que le Douglas. Ce choix a néanmoins imposé de rassembler des informations parfois difficiles à obtenir.

Nous avons ainsi pu constituer une base de données complète à partir de données IFN publiées de 2014 à 2019, issues de mesures prises entre 2009 et 2018.

4.2. Calcul de l'évolution des stocks entre 2020 et 2050

4.2.1. Principes de base

La courbe générale d'évolution des stocks sur pied et le cycle du carbone ont été présentées au chapitre 2. Un modèle de croissance « PRM » *(production-récolte-mortalité)* a été construit pour estimer les variations de stock des compartiments du cycle pour chaque situation.

Les variations de carbone atmosphérique résultant d'une stratégie donnée de filière forêt-bois sont nommées « *émissions nettes », qui peuvent être* positives ou négatives (puits). Sur la période 2020-2050 concernée par ce rapport, en appliquant le principe de conservation elles peuvent être calculées par la somme des variations des stocks de carbone dans les différents compartiments sous l'influence de cette filière (FAO, 2014 ; Federici et al., 2015), calculées par les entrées et sorties *:*

Compartiment	Entrée de Carbone	Sortie de Carbone
Biomasse vivante des arbres (Bv)	Production primaire	Mortalité et prélèvement
Biomasse morte des arbres (Bm)	Mortalité de Bv	Décomposition de Bm
Carbone du sol (Ss)	Intégration de Bm	Respiration / Minéralisation
Produits-bois (Pb)	Apport de produits-bois durables	Combustion de Pb (fin de vie)
Stocks fossiles (Sf)	Négligeable sur 30 ans	Emissions de la filière*

** Emissions de combustion des énergies fossiles utilisées pour mobiliser, transformer et recycler les produits.*

Ainsi : Emissions nettes générées sur la période 2020-2050 = $\Delta Bv + \Delta Bm + \Delta Ss + \Delta Spb + \Delta Ssf$

Avec :
$\Delta Bv = \Sigma_{2020\text{-}2050} (Production_{Bv} - Récolte_{Bv} - Mortalité_{Bv})$
$\Delta Bm = \Sigma_{2020\text{-}2050} (Mortalité_{Bv} - Récolte_{Bm} - Décomposition_{Bm})$
$\Delta Ss = \Sigma_{2020\text{-}2050} (Intégration_{s} - Respiration / Minéralisation_{s})$
$\Delta Pb = \Sigma_{2020\text{-}2050} (Apport\ de\ Pb\ durables - Combustion_{Pb})$
$\Delta Ssf = \Sigma_{2020\text{-}2050} (Q_{bois} \times CS)$ avec CS = coefficient de substitution des produits ($t\text{-}CO_2/m^3$).

Au vu des données et moyens disponibles, nous avons choisi une approche empirique (statistique) et non mécaniste (écophysiologique). En effet, la littérature montre que la construction du calculateur idéal évoqué ci-dessus impliquerait la création de modèles et sous-modèles assez complexes et dont les paramètres font tous objets de recherches et débats. Intégrant ou non la gestion forestière, les modèles simulant le fonctionnement

et la dynamique des écosystèmes forestiers sont en développement (Dufrêne et al., 2005 ; Morin et al., 2018), mais leur utilisation pour un but prédictif constitue aujourd'hui un front de recherche. Des calculateurs statistiques relativement simples sont récemment développés pour une parcelle donnée (CNPF, 2017 ; Gleizes & Martel, 2019) et permettent de dresser des diagrammes très visuels de l'évolution des stocks de carbone dans la biomasse aérienne et les produits. Les calculateurs sont cependant bien plus complexes à appréhender pour un ensemble diversifié de peuplements soumis à des sylvicultures variées.

Pour réaliser les calculs prospectifs, nous nous sommes inspirés de plusieurs méthodes : IFN, 2005 ; Gleizes, 2017 ; Roux et al., 2017 ; EFESE, 2017 ; Valade et al., 2017 ; Leturcq, 2018. Un modèle « PRM » (production-récolte-mortalité) a été construit pour simuler les stocks et les flux pour tous les compartiments par hectare de peuplement défini par son essence principale. Les résultats ont ensuite été importés dans des feuilles Excel pour rassembler et figurer les valeurs par situation de gestion.

4.2.2. Biomasse vivante

L'IFN inventorie les arbres de diamètre dépassant 7,5 cm (les autres sont dits « non-recensables ») et calcule le volume « bois fort tige » (ft), donc hors branches et souches. Or la biomasse vivante des arbres comprend le bois fort, les branches et les racines, donc est estimée comme suit :

$$Bv = B_{ft} \times (1 + Ce_{br} + Ce_{ra})$$

Où : Ce_{br}, Ce_{ra} = coefficients d'expansion branches (br) et racines (ra), définis ici pour simplifier le calculateur par : $Ce_{br} = \frac{B_{br}}{B_{ft}}$; $Ce_{ra} = \frac{B_{ra}}{B_{ft}}$.

Les coefficients d'expansion (branches, racines) font en soi l'objet de débats étant donné les facteurs influents (essence, traitement…). Pour cette étude, nous retiendrons les valeurs moyennes de Lousteau et al., (2010) et CNPF (2017) pour les feuillus et les résineux.

Comme toute population biologique, à partir d'un milieu non arboré et dans un environnement constant, la biomasse ligneuse suit une courbe exponentielle croissante jusqu'à un point d'inflexion (accroissement courant maximal), puis tend vers un maximum de manière asymptotique (Zeide, 1993). Ainsi la biomasse se rapproche progressivement d'un maximum où la production est compensée par la mortalité. Une fois le couvert fermé, si production et prélèvement sont constants, l'évolution du volume peut s'écrire :

$$\frac{\partial Bv}{\partial n} = P - R - M$$

où : Bv = volume ligneux vivant (m³/ha) ; n = année ;
P = production biologique de l'année n (m³/ha/an)
R = récolte + pertes d'exploitation de l'année n (m³/ha/an)
M = mortalité de la biomasse à l'année (m³/ha/an)

La résolution de cette équation différentielle est une exponentielle donnant l'évolution du volume de biomasse avec le temps après le maximum d'accroissement courant (Leturcq, 2018). Si le taux de mortalité en % de Bv est constant, il peut être caractérisé par une constante de renouvellement du volume sur pied telle que $M = \frac{1}{T}$, et la résolution de l'équation différentielle donne :

$$Bv_n = Bv_o \times \exp(-\frac{n}{T}) + T \times (P - R) \times [1 - \exp(-\frac{n}{T})] \quad \text{où} \quad Bv_o = \text{volume initial}$$

Cette expression donne la courbe croissante asymptotique présentée au chapitre 2.1. T caractérise la rapidité d'évolution du capital sur pied vers sa valeur asymptotique T(P–R). Comme $T = \frac{1}{M}$, la mortalité M influence directement le capital sur pied maximum (Bv_{max}) et le délai nécessaire pour arriver à ce capital. Ainsi, pour une production donnée (essence/station), le volume maximal atteint est d'autant plus élevé que le prélèvement et la mortalité sont faibles. Cette expression permet de calculer le volume bois fort à n'importe quel âge du peuplement (n) une fois la canopée fermée.

Pour intégrer la probable variation du taux de mortalité, nous calculerons l'évolution du volume par récurrence annuelle et plutôt que par la formule exponentielle, les deux donnant évidemment le même résultat.

Si : P_n = production bois fort tige brute de l'année n (m^3/ha/an)
Alors : $PN_n = P_n - M_n \times Bft_n$ = production bois fort tige nette de l'année n (m^3/ha/an)

Et d'une année à la suivante (n–1 à n) le **volume de bois fort sur pied (m^3/ha) évolue comme suit** :

$$Bft_n = Bft_{n-1} + PN_n \times (1 - Rft)$$

Avec : Rft_n = taux de prélèvement du bois fort tige (%), selon le scénario de gestion.
M_n = taux de mortalité de l'année n = $\frac{\text{volume mort}}{Bv_{n-1}}$ (%)

Au chapitre 3 on a défini les valeurs initiales de M pour chaque essence, ainsi que son évolution annuelle par le facteur « a ».

Au final, pour calculer l'évolution du **volume de biomasse aérienne** nous utiliserons la formule :

$$Bv_n = Bft_n \times (1 + Ce_{br} + Ce_{ra}) - Rbr \times PN_n \times Ce_{br}$$

Avec : Rbr = taux de récolte des branches coupées (%), constante du scénario de gestion.
Bv_o (Bv en 2020), et M_o (M en 2020) sont donnés par l'IFN (2019a).
P selon l'IFN (2019a) est considérée constante par hypothèse expliquée plus bas.

Rbr peut être très variable selon les situations (pente, distances de débardage), les bois, les débouchés possibles et les choix sylvicoles, comme expliqué au § 3.6.2.

4.2.3. Biomasse morte et pertes d'exploitation

Le bois mort est constitué du bois fort tige mais également des branches et des racines. L'IFN inventorie le bois mort debout et chablis en bois fort tige, et à terre en tige et branches (IFN, 2012b), les souches mortes n'étant pas considérées. En 2012 et 2014 la valeur moyenne pour la France était de 8 m^3/ha (IFN, 2012b ; IFN, 2014). Puis un changement de méthode a eu pour intégrer les bois morts de tous âge et non seulement de moins de 5 ans, de sorte qu'en 2018 la charge totale moyenne en bois mort serait de 23 m^3/ha (IFN, 2019a). Les valeurs 2018 nous paraissent élevées mais nous les retenons pour le stock initial par essence en considérant qu'il inclut tout le bois mort aérien sans distinction de diamètre, d'âge ou d'état. Cette valeur moyenne couvre certainement une très grande variabilité locale y compris au sein d'un type de peuplement, en lien avec le niveau de gestion des parcelles.

Le volume de bois mort aérien (Bma) et racinaire (Bmr) se décompose progressivement en forêt, donc se calcule comme suit en démarrant à l'année n = 1 où Bm_o est donné par IFN (2019a) :

$$Bma_n = [Bma_{n-1} + M_n \times Bft_{n-1} \times (1 + Cebr \times (1 - Rbr)) + PEa] \times (1 - \frac{1}{DD})$$
$$Bmr_n = (Bmr_{n-1} + M_n \times Bmr_{n-1} + PEra) \times (1 - \frac{1}{DD})$$

Où : DD = durée moyenne de décomposition du bois mort en forêt = $\frac{\text{demi-vie}}{\ln(2)}$ (années).
et PE = pertes d'exploitation aériennes (PEa) et racinaires (PEra), en m^3/ha perdus.

Pour être exact, il faudrait distinguer DD pour les branches, le bois fort et les racines, tant pour le bois mort naturellement que pour les pertes d'exploitation, mais la littérature ne le fait pas et cette distinction aurait probablement peu d'effet sur 30 ans. Pour le niveau 2020 et bois mort racinaire, en l'absence de données, nous l'avons supposé égal à la moitié du volume de bois mort aérien total donné par l'IFN.

Roux et al (2017) donne les demi-vies du bois mort ci-dessous pour les forêts gérées, soit en durées de vie (DV-Bm) : 43,3 ans pour les bois feuillus de diamètre supérieur à 7 cm, 14,4 ans pour les résineux de diamètre supérieur à 7 cm et 7,2 ans pour les bois résineux et feuillus de diamètre inférieur à 7 cm. Ces valeurs sont

transformées en durées de vie et modulées selon le diamètre des bois morts présents. En estimant avec les prélèvements le rapport entre volume de bois mort de diamètre supérieur et inférieur à 7 cm, on prendra les moyennes suivantes :

		Sylviculture continue			
Situation	**LE**	**Ecos**	**R60**	**R95**	**Impasses**
Volume D> 7cm / Volume D < 7cm	4	3	1,5	0,5	0,5
Feuillus	36	34	29	19	19
Résineux	13	12	11	10	10

Nous modulons ensuite ces moyennes par essence, comme indiqué à titre d'exemple pour R60 dans le tableau des paramètres donné en § 4.2.9. On note aussi qu'une partie du bois mort est réintégrée au sol, ce qui augmente la durée de vie du carbone stocké. Toutefois ce gain de stockage devrait être considéré dans le stockage annuel dans les sols présenté ci-dessous, du moins pour ce qui concerne les forêts gérées en sylviculture continue, puisque l'estimation est faite sur des placettes Renecofor (gérées) et sous couvert forestier.

Les **pertes d'exploitation** représentent les sciures, écorces tombées et tout le bois mort coupé et non récolté. Elles sont aujourd'hui mal documentées donc difficile à estimer, car elles dépendent du détail des produits enlevés et des possibilités de survie des racines grâce aux anastomoses et aux rejets sur souche. Pour distinguer le bois mort aérien (a) et racinaire (ra) et les pertes associées (PEa et PEra), on calcule ces compartiments de manière séparée, par les formules suivantes (m^3/ha) :

$$PEa = Rft \times PN_n \times Ce_{br} \times (1 - Rbr)$$
$$PEra = Rft \times PN_n \times Ce_{ra} \times M_{ra} \text{ (sans prélèvement de souches).}$$

Où : M_{ra} = taux de mortalité des racines après la coupe (%).

Le facteur M_{ra} semble très peu documenté. Pour cette étude, on prendra 30% sylviculture continue (éclaircie) et 10% en impasses (coupe rase). Ces chiffres devraient être affinés, mais la littérature sur le sujet manque. Une partie du carbone des racines mortes s'intègre au sol plutôt que ne repart dans l'atmosphère, mais on traitera cet aspect comme expliqué ci-dessus pour le bois mort en général. On notera qu'une erreur sur le facteur M_{ra} aurait des conséquences relativement limitées.

4.2.4. Carbone du sol

Ce compartiment est essentiel *mais les estimations divergent :* en France, il représenterait en moyenne 300 t-eqCO_2/ha sur le premier mètre (Jonard et al., 2019 ; Derrien, 2018) et 610 t-eqCO_2/ha en tout (Martel et al., 2017 in EFESE, 2019) ou en moyenne 1,32 fois le carbone de la biomasse (Dupouey et al., 2000). Sur le premier mètre, le stock serait à 50% dans l'horizon de surface (0-30 cm), avec un temps de résidence moyen de 30 ans à 10 cm et 300 ans à 40 cm (Derrien, 2018). Si le stock au-delà de 1m peut être important, on peut ainsi considérer qu'il est très stable.

Les sols forestiers de France continuent à jouer un rôle de puits (Jonard et al., 2019), mais le flux par type de peuplement est difficile à établir. Les pratiques sylvicoles, particulier dans la situation des impasses (découverte du sol), pourrait réduire cette capacité du moins temporairement. Toutefois le stockage devrait à priori atteindre un plafond, lorsque le stockage du volume ligneux plafonnera comme expliqué plus haut, donc il évoluera selon l'équation suivante :

$$Ss_n = Ss_o \times \exp(-\frac{n}{T}) + Ts \times As \times [1 - \exp(-\frac{n}{T})]$$

Où : Ss_o = stock initial ; Ts = constante de renouvellement du C-sol
As = stockage annuel brut.

Il est possible d'approximer Ss_o, mais très difficile de fixer le temps de résidence global du carbone dans le sol (Ts) – probablement élevé, de même que le stockage annuel brut (As). Ces incertitudes rendent délicates l'utilisation de la formule ci-dessus. Il existe des différences de stockage annuel selon les essences, les peuplements et les pratiques mais elles sont peu documentées. La période 2020-2050 étant très courte pour un sol, on approchera le stockage de carbone dans le premier mètre en cumulant jusque 2050 un stockage annuel net moyen de 1,28 t-eqCO_2/ha (Jonard et al., 2019). Il est possible que ce stockage annuel soit supérieur en forêt laissée en libre évolution, du fait de l'apport de bois mort et du microclimat plus tamponné. Toutefois ce compartiment est important en stock mais sa variation potentielle est relativement faible sur 30 ans, donc une erreur devrait avoir un effet limité. En revanche pour la perspective 2050-2100 étudiée au § 5.2.5, on prendra un stockage annuel se réduisant de 2% chaque année, ce qui mène à une valeur de 0,47 t-eqCO_2/ha en 2100 (et 0,17 t-eqCO_2/ha en 2200 pour la perspective de long terme étudiée en libre évolution).

4.2.5. Récoltes

Les volumes totaux de bois récoltés sont le résultat des options de prélèvement définies plus haut, soit :

- le taux de prélèvement du bois fort tige ;
- le taux de prélèvement des branches (biomasse aérienne hors tige principale) ;
- le taux de prélèvement de la biomasse morte naturellement ;
- le taux de prélèvement des racines (nul) ;
- la part de bois d'œuvre dans le bois fort tige ;
- le taux de panneaux et de rondins-poteaux-piquets dans le BIBE récolté.

Ce qui donne les récoltes à l'année n :

$$\text{Récolte fort tige (n)} = PN_n \times Rft$$
$$\text{Récolte branches (n)} = Rbr \times Rft \times Ce_{br}$$
$$\text{Récolte arbres morts (n)} = R_M \times M_n \times Bft_{n-1} \times (1 + Ce_{br}) \text{ *}$$

→ Récolte totale (n) = Récolte fort tige (n) + Récolte branches (n) + Récolte arbres morts (n)

$$\text{Récolte bois d'œuvre (n)} = Rft \times \%BO \times \%V_{BO} \text{ *}$$
$$\text{Récolte BIBE} = \text{Récolte totale (n)} - \text{Récolte BO (n)}$$
$$\text{Récolte BI panneaux (n)} = 0{,}10 \times \text{Récolte BIBE (n)} \text{ *}$$
$$\text{Récolte BI poteaux-rondins-piquets} = 0{,}02 \times \text{Récolte BIBE (n)} \text{ *}$$
$$\text{Récolte BIBE papier} = 0{,}18 \times \text{Récolte BIBE (n)} \text{ *}$$

→ Récolte BE (bois-énergie) = BIBE – BI panneaux – BI poteaux-rondins-piquets – BIBE papier

* Selon les chiffres FCBA (2018), et avec :

R_M = taux de récolte des arbres mort naturellement (%) ;
%BO = part de bois d'œuvre dans la tige estimé sur le terrain par IFN (2019a) ;
$\%V_{BO}$ = taux de valorisation réelle du bois d'œuvre, fixé ici à 80% pour limiter au maximum le gaspillage (la réalité actuelle serait de 75%, on suppose une évolution de 75% en 2020 à 85% en 2050).

Pour le BIBE on obtient bien entendu des volumes « bois ronds », différents des volumes de produits comprenant les connexes de transformation ou le bois recyclé. On rappelle que dans notre scénario principal, tout le BIBE récolté est issu d'éclaircies, à l'exclusion des coupes rases effectuées en situation d'impasse selon les critères définis plus haut.

4.2.6. Stock de produits-bois

Le bois d'œuvre (BO) est constitué exclusivement des bois sciables tandis que le terme BIBE désigne les bois utilisables pour un usage en trituration (papier, énergie, panneaux) ou en rondins, piquets et poteaux, débouchés généralement interchangeables. Dans le compartiment BIBE, le BE et le papier ont une durée de vie moyenne de 1 an (CNPF, 2017) donc leurs stocks seront négligés. Les sciages et le bois d'industrie

finissant en panneaux et poteaux constituent en revanche un stock plus ou moins durable. Si DV est la durée de vie des produits, le stock de produits-bois en 2050 (Pb) de chaque produit évolue d'année en année selon la formule :

$$Pb_n = (Pb_n - 1 + T \times R\text{-}BO_n) \times (1 - \frac{1}{DV})$$

Où : $R\text{-}BO_n$ = BO transformé de l'année n (m^3/ha) = cfr § 4.2.5.
T = rendement de transformation du produit (%).
DV = durée de vie moyenne du produit = $\frac{\text{demi-vie}}{\ln(2)}$.

Les stocks initiaux de produits (Pb_0) pour la France métropolitaine sont issus de Roux et al. (2017) : 322 m^3 pour le bois d'œuvre, 74 Mm^3 pour les panneaux et 12 Mm^3 pour les piquets, rondins et piquets. Bien entendu, le stock plafonne d'autant plus vite que DV est faible.

Selon FCBA, en 2018 le volume stocké en panneau-piquets-rondins soit 8 Mm^3/an est le résultat d'un triple approvisionnement : BIBE (bois ronds) pour 50%, BO (connexes de transformation) pour 30% et bois recyclés (fin de vie du BO) pour 20%. Nous avons donc réintégré dans le stock de BI durable la partie correspondante de connexes de transformation et de fin de vie du BO.

La durée de vie des produits (DV) est supposée constante pour la période 2020-2050. CNPF (2017) préconise une demi-vie moyenne de 35 ans pour le BO et 25 ans pour les panneaux, ce qui correspond respectivement à 50 et 36 ans. Cependant pour le BO, il faut considérer que 36% des sciages (palette et emballage) ont une durée de vie est très faible. On fixe donc DV à 40 ans pour BO et 30 ans pour le BI durable (36 ans pour les panneaux et 10 ans pour les rondins, piquets et poteaux). Pour les rendements de première et seconde transformation des produits (T) :

- Pour le bois d'œuvre, selon l'essence et la qualité le rendement moyen de 1e transformation est de 41 à 58% (FCBA, 2018) et on retient une moyenne de 50%. Les pertes de la seconde transformation (brûlées) ne sont parfois pas considérées dans les analyses (Roux et al., 2017) et sont pourtant significatives. En effet, pour le bois d'oeuvre la seconde transformation rajoute jusque 50% de pertes en volume pour (pertes en merrains selon FCBA 2018, moins en construction). En résineux la part de menuiserie/ameublement est plus faible. Pour le bois d'œuvre, on prendra donc un rendement de seconde transformation de 70% en feuillus et 90% en résineux, ce qui donne au total T_{BO} = 40% en feuillus et 45% en résineux.
- Pour les panneaux et les rondins, piquets et poteaux, on prendra un rendement global de 90%.

4.2.7. Substitution et émissions de la filière

L'estimation des coefficients de substitution (nommés aussi facteurs de déplacement) permet d'évaluer la pertinence de remplacer des matériaux ou des énergies non-bois par le bois (Sathre & O'Connor, 2010) pour les gaz à effets de serre. Comme expliqué au chapitre 2 :

$$CS = \frac{GES_{non\text{-}bois} - GES_{bois}}{Q_{non\text{-}bois} - Q_{bois}} \ (t\text{-}eqCO_2/m^3)$$

où GES = CO_2 (dans ce cas) ; Q = quantité utilisée pour l'ouvrage.

Le gain annuel de la substitution vaut ainsi : CS × m^3 utilisé (t-eqCO_2/an).

Les coefficients de substitution sont généralement établis en t-eqCO_2 par m^3 de bois utilisé. Un CS positif signifie donc un effet climatique bénéfique de l'usage du bois. Toutefois les CS dépendent de nombreux facteurs comme expliqué au chapitre 2. Les émissions générées par la sylviculture et l'exploitation forestière dépendent des pratiques adoptées et en pleine évolution aujourd'hui.

Pour le bois-matériau, nous intégrons les effets de substitution avec un coefficient moyen issu de la littérature actuelle, à partir des volumes destinés à cet usage et des rendements de transformation comme indiqué au § 4.2.6. Dans la littérature le coefficient va de 0,59 à 3,47 par t-eqCO_2 par m^3 mis en œuvre et pour la France, les valeurs utilisées vont de 1,1 (CNPF, 2017) à 1,6 (Roux et al., 2017), mais les valeurs hautes intègrent les

bénéfices de la substitution-énergie des connexes de transformation. Comme Valade et al. (2017) il nous a semblé plus rigoureux de séparer les effets matériau et énergie. On retiendra ainsi la valeur de 1,2 t-eqCO_2 par m^3 de BO après transformation, en comptant à part le bénéfice de l'usage des connexes en bois-énergie. Cela qui signifie qu'en moyenne, construire un ouvrage en bois émet 1 GES pour 2,2 avec les matériaux concurrents « classiques ». Ce choix de séparation mène logiquement à un bénéfice de substitution énergie en apparence supérieur à celui les approches rassemblant intégrant les connexes dans le coefficient.

Pour le bois-énergie, vu le les effets de substitution dépendent fortement des pratiques (chapitre 2) et pourraient même être négatifs (émissions nettes) avec les pratiques actuelles ou prévues par certains scénarios intensifs. Toutefois, notre scénario prévoyant de n'utiliser en bois-énergie que le bois non valorisable en produits durables, en supposant cela et une amélioration du rendement des équipements de chauffage, nous estimerons un bénéfice potentiel par substitution-énergie. Selon Olivier et al (2014), le coefficient de substitution (CS) bois-énergie irait de 0,37 à 0,64 t-eqCO_2/m^3. Or ces valeurs n'intègrent pas toutes les émissions ni le temps de retour de la dette-carbone (cfr chapitre 2), élevée en cas de coupe rase (impasses). Ainsi pour cette étude on retiendra un coefficient moyen de 0,4 t-eqCO_2/m^3.

Utiliser les Coefficients de Substitution pour les scénarios d'atténuation mériterait toutefois une analyse bien plus fouillée, donc ces effets estimés seront donnés à titre indicatif, avec toutes les réserves liées à leur grande marge de valeurs possibles selon les variables de filières et de société.

4.2.8. Facteurs de conversion

L'objectif est de chiffrer les scénarios étudiés en équivalent CO_2 stocké. Pour le bois (Bv, Bm, Pb) il faut utiliser l'infradensité (tonne anhydre par m^3 de bois vert), la proportion massique de carbone (t-C/t-bois) et le rapport C/CO_2 valant 3,664. On utilisera les facteurs de conversion de Lousteau (2010) et FCBA (2018) intégrant ces trois paramètres :

Pour les feuillus : 1 m^3 bois = 0,27 tonne de Carbone = 0,989 t-eqCO_2
Pour les résineux : 1 m^3 bois = 0,22 tonne de Carbone = 0,806 t-eqCO_2

Le facteur de conversion moyen est alors obtenu en pondérant ces deux valeurs selon les volumes respectifs de résineux et de feuillus. Pour la forêt française en 2019 on obtient la valeur de **0,930 tCO_2/m^3**.

4.2.9. Résumé des paramètres retenus

On résume les paramètres en page suivante selon les situations de gestion. La colonne « France » donne les valeurs utilisées pour les simulations à l'échelle de la France, où P est réduite de 2% pour intégrer les 2% en surface de peuplements « non-recensables ».

Pour les surfaces classées par l'IFN en « Non-identifié » (0,273 Mha) nous avons retenu les valeurs moyennes des autres essences. Pour les surfaces classées « non-recensables » (0,280 Mha) nous avons pris des valeurs moyennes de plantations de 15 ans (D.10 cm, Hm7m).

Pour la **substitution**, comme expliqué en § 4.2.7 le coefficient moyen retenu est, avec toutes les réserves citées, de 1,2 t-eqCO_2/m^3 pour le bois-matériau et de 0,3 t-eqCO_2/m^3 pour le bois-énergie.

Paramètres communs à toutes les Situations et tous les Scénarios																			
Paramètre	**CHpe**	**CHse**	**CHAT**	**CHpu**	**CHv**	**HE**	**FR**	**CHAR**	**FD**	**PM**	**PS**	**PN**	**DOU**	**EP**	**SP**	**RD**	**NI**	**NR**	**France**
Production brute bois fort tige (P en m³/ha/an)	4,76	5,28	6,62	2,20	1,34	5,64	5,85	5,09	4,53	7,39	4,43	5,04	14,62	12,86	11,74	5,00	5,00	5,00	5,61
Volume bois fort tige initial (V_o en m³/ha)	172	207	173	83	53	224	169	167	97	131	155	144	305	341	357	147	150	30	170
Volume bois mort initial (Bma en m³/ha)	23,6	19,0	46,9	11,1	6,5	29,1	30,7	28,6	26,7	20,0	23,6	18,5	32,2	41,8	49,0	26,8	22,0	7,1	22,9
Coefficients d'expansion (Ce)	Branches = 0,61 ; racines = 0,45 (total 1,06)									Branches = 0,33 ; racines = 0,40 (total 0,73)							0,50 / 0,40		0,52 / 0,43
Paramètres pour Libre Evolution seulement (LE-M1, LE-M2)																			
Paramètre	**CHpe**	**CHse**	**CHAT**	**CHpu**	**CHv**	**HE**	**FR**	**CHAR**	**FD**	**PM**	**PS**	**PN**	**DOU**	**EP**	**SP**	**RD**	**NI**	**NR**	**France**
Mortalité initiale (M_o en %Bv) : IFN 2013-2017 × 2	0,40	0,20	2,60	0,40	0,40	0,20	0,60	0,20	0,60	0,40	1,00	0,60	0,60	1,00	0,40	0,60	0,40	0,40	0,60
Durée de décomposition du Bm (ans)	42			40		30				14			16	12		13	25		30
Paramètres pour les forêts gérées seulement (Sylviculture Continue et Impasses)																			
Paramètre	**CHpe**	**CHse**	**CHAT**	**CHpu**	**CHv**	**HE**	**FR**	**CHAR**	**FD**	**PM**	**PS**	**PN**	**DOU**	**EP**	**SP**	**RD**	**NI**	**NR**	**France**
Durée de décomposition du Bm aérien (ans)	34			33		25				12			14	10		10	11		22,9
Part de bois d'œuvre dans le tige (% Bft)	63	66	32	24	13	60	48	23	36	65	59	60	75	70	78	63	30		56%
Rendement de transformation (%)	BO = 40% ; panneaux (Bip) et rondins-poteaux (Blr) = 90%									BO = 45% ; Bip et Bir = 90%									42% / 90%
Paramètres pour Sylviculture Continue (SC) seulement																			
Paramètre	**CHpe**	**CHse**	**CHAT**	**CHpu**	**CHv**	**HE**	**FR**	**CHAR**	**FD**	**PM**	**PS**	**PN**	**DOU**	**EP**	**SP**	**RD**	**NI**	**NR**	**France**
Mortalité initiale (M_o en %Bv) : IFN 2013-2017 × 1,5	0,30	0,15	1,95	0,30	0,30	0,15	0,45	0,15	0,45	0,30	0,75	0,45	0,45	0,75	0,30	0,45	0,30	0,30	0,45
Volume bois fort tige à l'équilibre (V_o en m³/ha)	188	203	170	117	86	230	202	196	171	240	221	232	406	321	354	250	173	247	170
Rft 2020 France (LE+SC+Imp) selon IFN 2019 (%PN)	50%	49%	68%	26%	33%	54%	42%	50%	33%	90%	55%	68%	55%	78%	55%	69%	56%	56%	56%
Rft 2050 pour SC en scénario R60-M1 (%PN)	120%	100%	120%	50%	40%	110%	100%	80%	40%	50%	55%	55%	70%	120%	110%	40%	60%	40%	84%
Prélèvement des branches (Rbr)	50% à ajuster selon les essences, les ports et l'exploitabilité (R-mortalité = 0)																		50%
Prélèvement de la mortalité (R_M tige + branches)	20% (sécurité accueil, circulation pour les travaux)																		20%
Paramètres pour les Impasses seulement (prélèvement 100% de V + P (Bft) sur 2020-2050)																			
Paramètre	**CHpe**	**CHse**	**CHAT**	**CHpu**	**CHv**	**HE**	**FR**	**CHAR**	**FD**	**PM**	**PS**	**PN**	**DOU**	**EP**	**SP**	**RD**	**NI**	**NR**	**France**
Mortalité initiale (M_o en %Bv) : IFN 2013-2017 × 4	0,80	0,40	5,20	0,80	0,80	0,40	1,20	0,40	1,20	0,80	2,00	1,20	1,20	2,00	0,80	1,20	0,80	0,80	1,20
Prélèvement des branches (Rbr)	75% (nécessité de préparer le terrain avant plantation).																		
Prélèvement de la mortalité (R_M tige + branches)	75% (nécessité de préparer le terrain avant plantation).																		

Essences principales : CHpe = chêne pédonculé ; CHse = chêne sessile ; CHpu = chêne pubescent ; CHv = chêne vert ; CHA = châtaignier ; PM = pin maritime ; PS = pin sylvestre ; PN = pins noirs ; DOU = douglas ; EP = épicéa ; SP = sapin pectiné ; HE = hêtre ; FR = frêne ; CHAR = charme ; RD = autres résineux ; FD = autres feuillus (dont robinier) ; Bv = biomasse vivante totale ; Bft = bois fort tige (tige principale D > 7 cm) ; Bm = bois mort naturellement (M) ; Prélèvements : Rft = % de la production nette bois fort tige prélevée.

5. RESULTATS ET DISCUSSION

5.1. Evolution du taux de prélèvement bois fort tige

Pour rappel, les scénarios étudiés sont caractérisés par :

		Taux de prélèvement en Sylviculture Continue (%)			Situations (% forêt gérée)	
Scénario Gestion-Mortalité		**Bois fort tige (Rft)**	**Branches**	**Mortalité**	**Imp. 2020-50**	**SC**
Priorité écosystème	Ecos-M1	Adapté pour une baisse linéaire de la récolte totale	20% *	10% *	4,5 à 5,0%	100 moins %Impasse
	Ecos-M2				4,5 à 9,0%	
Compromis	R60-M1	Adapté pour une récolte totale stable à 60 Mm^3/an	50% *	20%*	4,5 à 5,0%	
	R60-M2				4,5 à 9,0%	
Priorité filière	R95-M1	Adapté pour une augmentation linéaire de la récolte totale jusque 95 Mm^3/an en 2050	75%	75%	4,5 à 5,0%	
	R95-M2				4,5 à 9,0%	

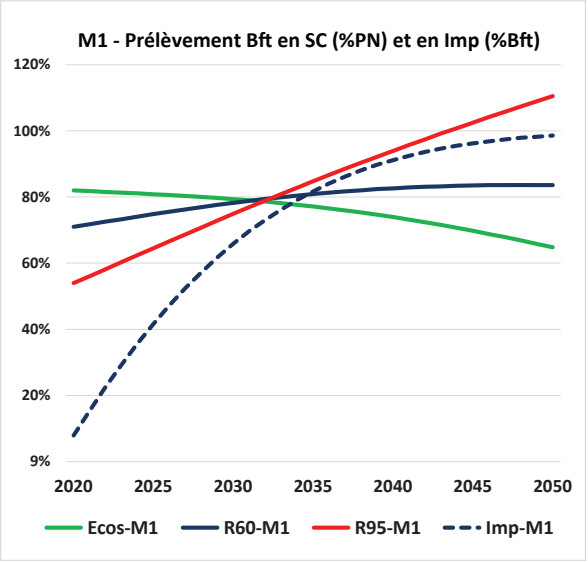
** 75% en Impasses.*

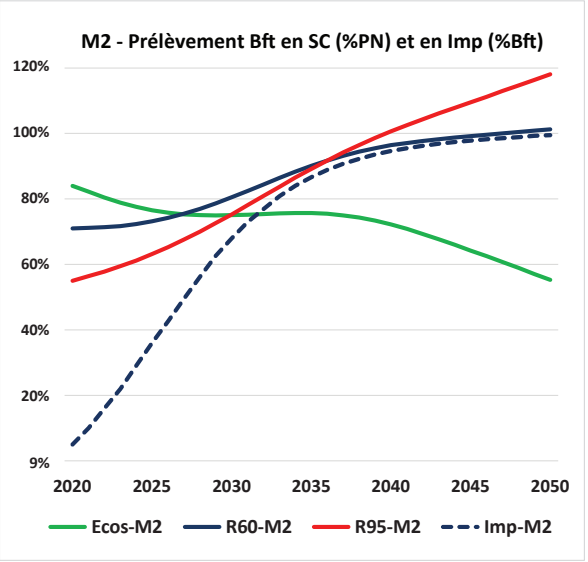
Pour tous les résultats, nous utiliserons la légende suivante :

LE = Libre Evolution ; SC = Sylviculture Continue ; Imp = Peuplements en impasses ; PN = production biologique nette ; Bft = bois fort tige ; M1 = mortalité progressant lentement ; M2 = mortalité progressant rapidement

Ss	Stock de carbone du sol	**Bv**	Biomasse Vivante
Bmr	Biomasse morte racinaire	**Pb**	Stock produits-bois
Bma	Biomasse morte aérienne	**Sm**	Substitution matériau.

L'application des scénarios ci-dessus donne les **évolutions** suivantes. Sur ce diagramme, les prélèvements sont exprimés en % de la production bois fort tige nette pour Sylviculture Continue et en % du volume bois fort tige sur pied en Impasses (volume corrélé à la surface renouvelée).





En suivant le raisonnement présenté au § 3.2, dans les forêts gérées le taux actuel de prélèvement de la production nette bois fort tige serait de l'ordre de 80%, coupes rases comprises. Or les branches et le bois mort font l'objet de prélèvements supérieurs à la situation actuelle dans le scénario R95 et inférieur en R60 et Ecos, ce qui entraine en sylviculture continue des taux initiaux de prélèvement bois fort tige entre 57% (R95) et 82% (Ecos), la récolte des bois en impasse réduisant tous les taux. Il est évident que les changements nécessaires dans la nature des prélèvements demanderaient une période de transition. Au vu des diagrammes, on peut supposer que cette période s'étendrait de 2020 à 2030.

En Impasses, le taux augmente rapidement au début, pour atteindre 100% en 2050. De 2020 à 2030 il augmente un peu moins fort en M2 qu'en M1 du fait de l'identification de nouvelles surfaces en impasse non immédiatement exploitées (temps de décision et de démarches administratives) ; en revanche il augmente fortement ensuite sous l'effet de la forte hausse des taux de mortalité. On note qu'en alignant l'évolution des taux de prélèvement dans ces surfaces sur l'évolution des taux de mortalité, on produit une chute assez rapide du volume moyen sur pied, en dépit de l'apport de nouvelles surfaces classées en impasses. Concrètement, l'évolution du volume total sur pied en impasse dépendra de l'évolution des mortalités, des termes d'exploitabilité retenus et des seuils de mortalité au-delà desquels les gestionnaires consentent à réaliser des pertes d'exploitabilité face aux risques de perte économique totale. Cette prévision est donc particulièrement délicate et cette difficulté doit être intégrée lors de l'interprétation des résultats.

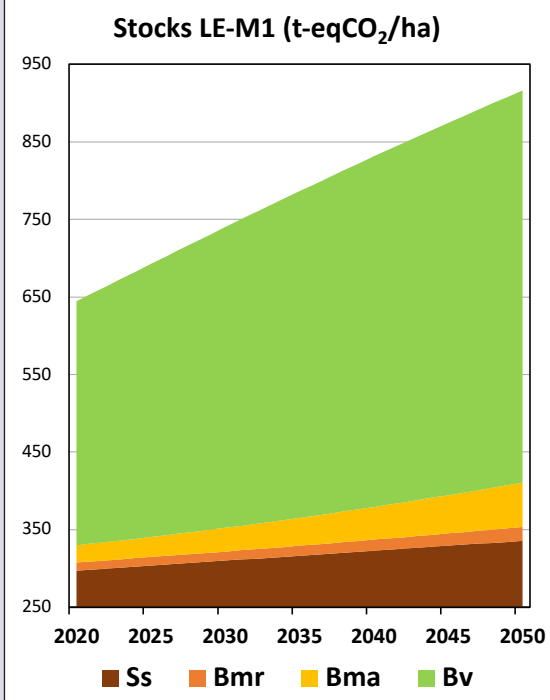
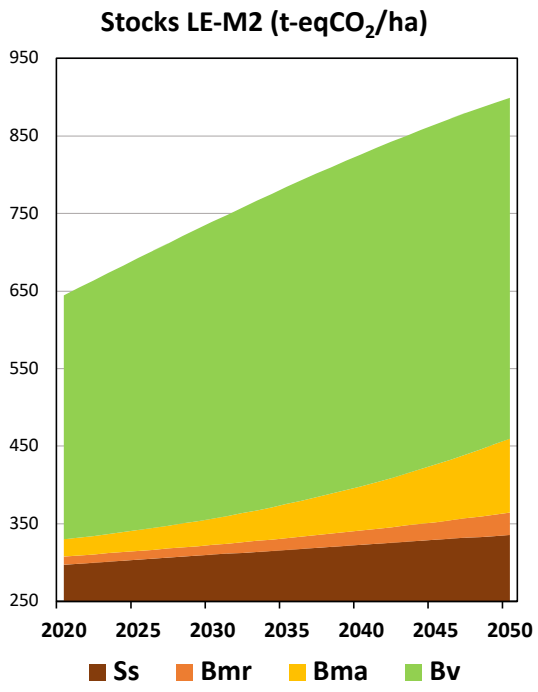
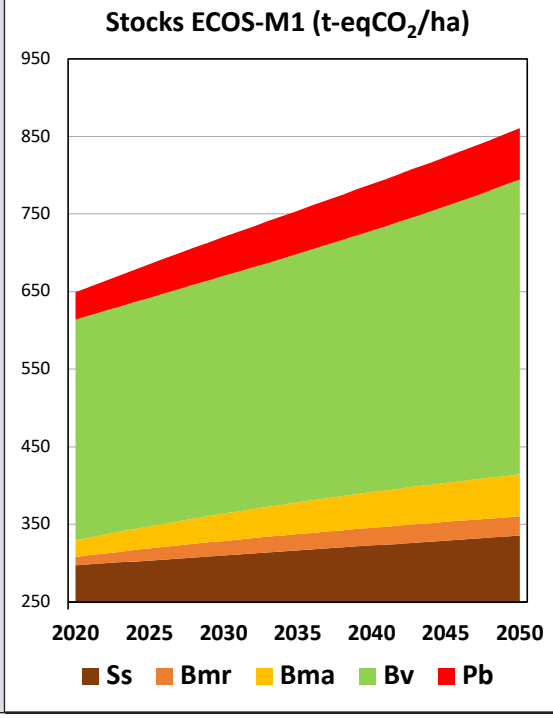
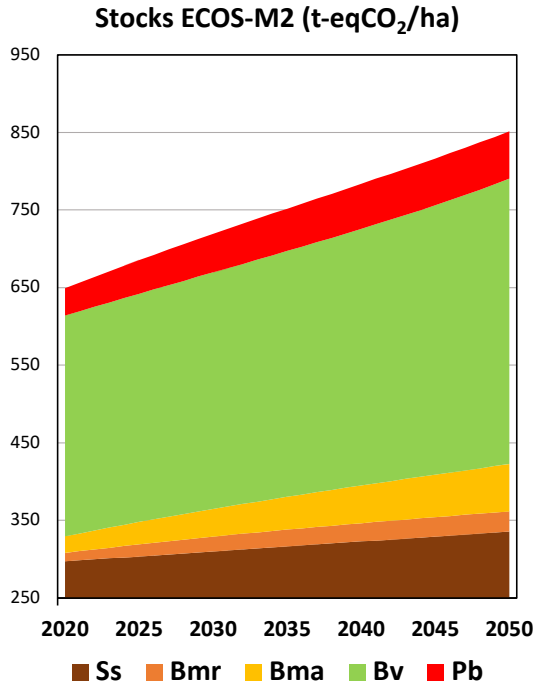
Cette évolution du prélèvement ne définit pas la répartition des volumes prélevés, mais le scénario retenu suppose que le peuplement des parcelles en impasse est récolté par coupe rase de 2 ha maximum. Dans les grandes parcelles homogènes d'épicéa, l'évolution sanitaire et mécanique des arbres pourrait imposer une succession de coupes rases de 2 ha, ce qui créerait les grandes ouvertures déjà bien connues, avec des conséquences paysagères mais aussi écologiques (sol, biodiversité).

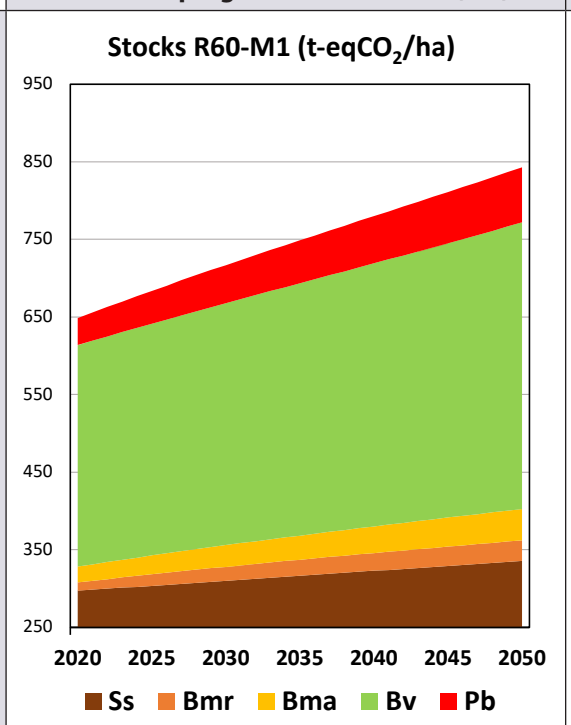
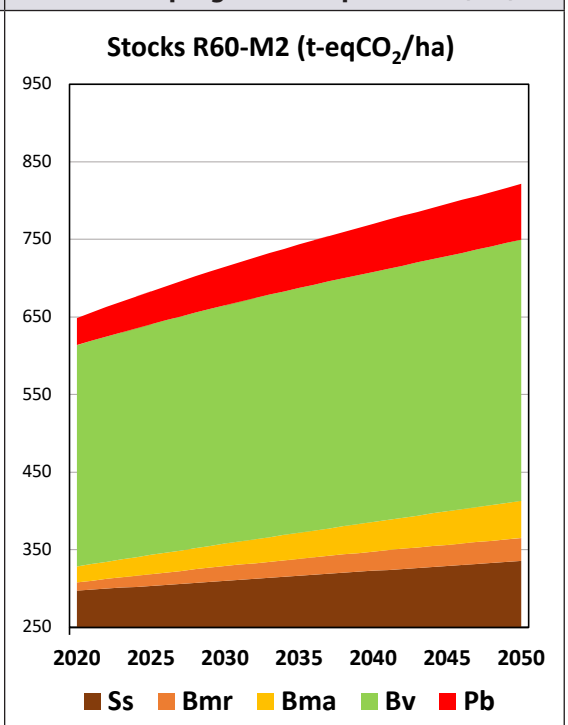
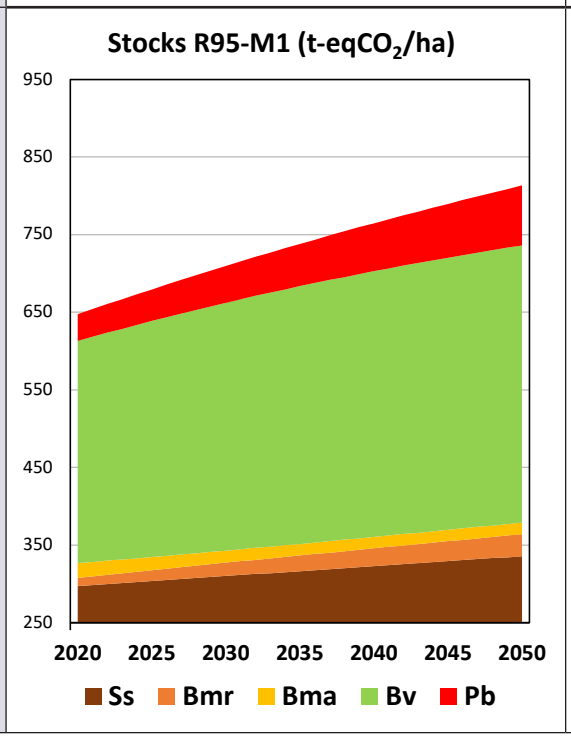
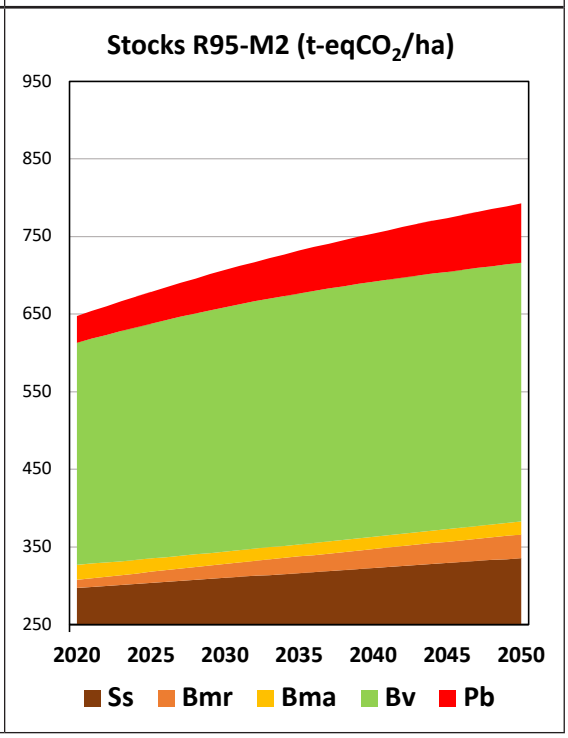
Dans l'évolution des prélèvements expliquée ci-dessus, les surfaces en Impasse apportent entre autour de 10 Mm^3/an la première décennie en « rattrapage » d'impasses actuelles, ce qui permet un prélèvement bois fort tige initial faible dans les scénarios R60 et R95. Il doit ensuite rapidement évoluer au fur et à mesure que les impasses sont reboisées donc non productives. La forte augmentation du taux de prélèvement dans le scénario R95 résulte de la hausse programmée des récoltes. Pour le scénario Ecos, la baisse des prélèvements est imposée par l'objectif d'atteindre le volume d'équilibre en 2050 avec la contrainte d'un très faible prélèvement des branches et du bois mort. Le taux chute fortement lorsque les impasses sont exploitées. On rappelle que ce taux de prélèvement est une moyenne résultant des taux de prélèvements de chaque essence, dont le détail est donné au chapitre 4 pour le scénario R60. Il est également à ventiler sur l'ensemble de la surface de chaque essence par une répartition entre les forêts selon leur capital initial et les obstacles à la mobilisation.

Quoiqu'il en soit, les taux de prélèvement des branches et de la mortalité « naturelle » (qui peut être provoquée par la gestion) sont déterminants, alors qu'ils ne sont pas toujours visibles dans les modèles simulant l'évolution des stocks du système forêt-bois en France.

5.2. Evolution des stocks

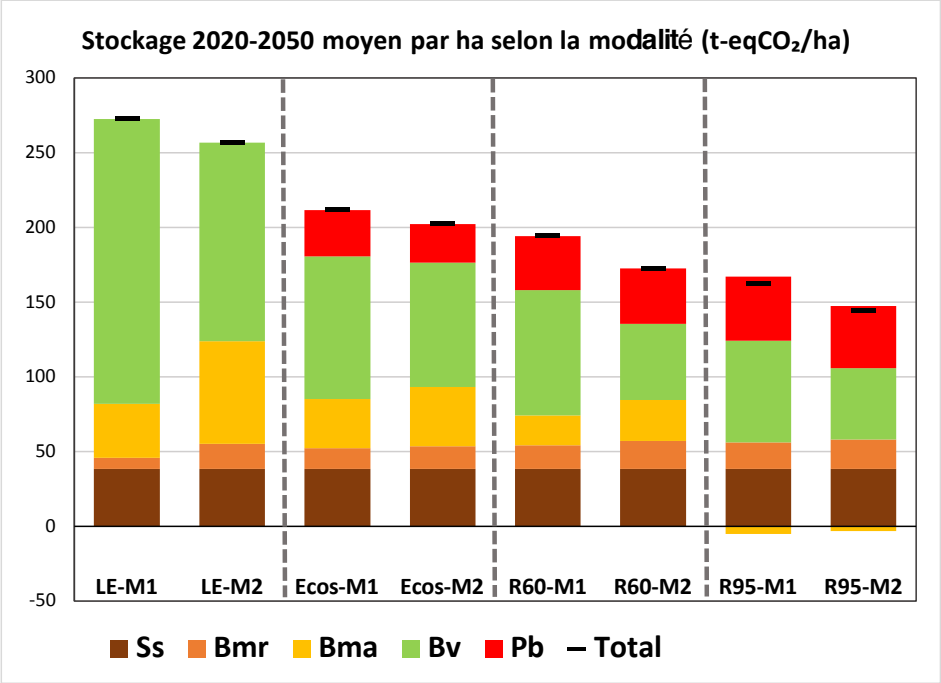
Selon la modalité de gestion, les stocks moyens évoluent comme présenté aux diagrammes ci-dessous, les figures pour Ecos, R60 et R95 rassemblant toutes les surfaces gérées (sylviculture continue + impasses). Cette logique sera utilisée pour tous les diagrammes ultérieurs.

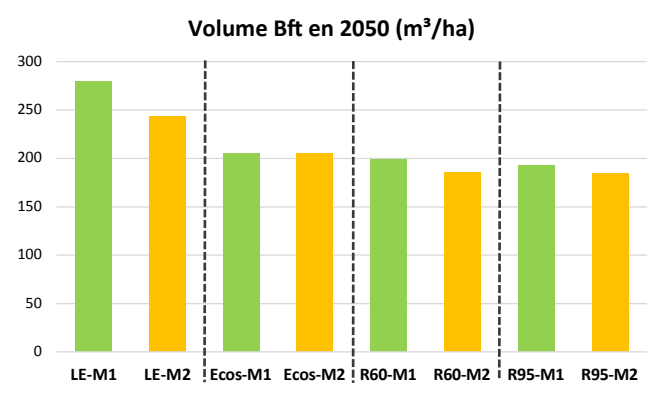
	Mortalité progressant lentement (M1)	Mortalité progressant rapidement (M2)
LE		
Ecos		

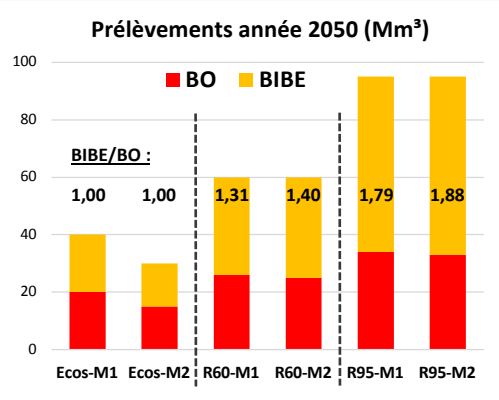
	Mortalité progressant lentement (M1)	Mortalité progressant rapidement (M2)
R60		
R95		

L'évolution du stock total ne montre pas de « creux » par décapitalisation des peuplements reboisés comme chez Roux et al., (2017), car les surfaces concernées sont limitées et les reboisements sont étalés sur 30 ans. En revanche, elle réduit l'aspect « convexe » de cette évolution, surtout en scénario Ecos où elle lui donne presque un caractère « concave ». Sans les impasses, la courbe en scénario R95 serait clairement convexe.

Les évolutions des stocks de biomasse vivante, de biomasse morte et de produits-bois expriment bien les caractéristiques des scénarios étudiés. La comparaison de l'effet des scénarios est plus visible avec les variations de stocks calculées entre 2020 et 2050 pour tous les compartiments. On représente ci-dessous cette variation rapportée à l'hectare, avec les niveaux de bois fort tige et les prélèvements atteints en 2050.







On note que dans le diagramme de variation de stock, la variation totale en R95 est le haut de la barre (Pb ou Sm) moins la perte de stock dans le bois mort (en négatif).

Le tableau ci-dessous détaille les produits récoltés selon le scénario, en supposant le maintien du schéma de filière actuel.

		Mm³ récolté				Mm³ après transformation				
Modalité	**Total**	**%BO**	**BI-du**	**Papier**	**BE-récolté**	**BO**	**BI-du**	**Connexes**	**Papier**	**BE-Total**
LE-M1	0	0%	0	0	0	0	0	0	0	0
LE-M2	0	0%	0	0	0	0	0	0	0	0
Ecos-M1	1480	740	178	133	429	311	160	447	45	832
Ecos-M2	1350	674	162	122	392	284	146	408	41	758
R60-M1	1860	819	223	187	631	344	201	497	50	1078
R60-M2	1860	775	223	195	667	326	201	472	47	1091
R95-M1	2340	819	281	274	966	344	253	503	50	1419
R95-M2	2340	812	281	275	972	341	253	500	50	1421

BI-du (durable) = BI utilisé en panneaux, poteaux, rondins et piquets.

Pour compléter, le tableau ci-dessous résume les prélèvements et les variations de stocks dans les scénarios étudiés. Les colonnes « évolution » donnent les variations 2020-2050 en % ; la colonne Bft-2050 SC donne le volume bois fort tige moyen atteint en 2050 dans les surfaces en sylviculture continue. Les dernières colonnes donnent les récoltes en 2050.

	Prélèvement SC (%)		Evolution 2020-2050 en %				Bft-2050 en SC	Récolte 2050 en Mm³			
Modalité	**Branches**	**Mortalité**	**Bv**	**Bma**	**Bmr**	**Pb**		**BO**	**BIBE**	**Total**	**BIBE/BO**
LE-M1	0	0	65	169	68	0	280	0	0	0	-
LE-M2			43	348	170	0	243	0	0	0	-
Ecos-M1	20	10	33	173	151	98	205	20	20	40	1,00
Ecos-M2			29	206	163	84	205	15	15	30	1,00
R60-M1	50	20	30	103	168	113	199	26	34	60	1,31
R60-M2			18	141	198	116	186	25	35	60	1,40
R95-M1	75	75	25	–24	187	133	193	34	61	95	1,79
R95-M2			17	–15	207	130	185	33	62	95	1,88

On constate qu'à partir d'un même état initial, c'est en libre évolution que les stocks augmentent le plus, même en cas de mortalité augmentée et en dépit des mortalités plus élevées affectées à cette modalité (en valeur initiale et en rythme d'évolution). Le volume d'équilibre est bien atteint par le scénario Ecos, tandis qu'en mortalité M1 il ne le sera que vers 2060 en scénario R60 mais plus tard en scénario R95.

Avec ou sans prélèvements, le stockage est inférieur en mortalité accentuée (M2), modalité qui augmente les stocks de bois mort en libre évolution et en gestion extensive (Ecos) et modérée (R60), mais pas en prélèvement intensif (R95) où il diminue même nettement au niveau aérien.

Naturellement, la mortalité accentuée M2 produit des stocks vivants inférieurs et plus de bois mort. Bien entendu, l'estimation de ce stock est influencée par la durée de décomposition du bois mort retenue.

On constate que l'effet de stockage dans la biomasse est largement dominant par rapport au stock dans les produits. Ce compartiment devient important dans les scénarios de forte récolte (R95), où la substitution devient également marquante. Ainsi, l'effet carbone de ces scénarios de forte récolte dépend plus fortement de l'estimation des durées de vie des produits et des coefficients de substitution. On étudiera ces effets au paragraphe suivant.

La différence de prélèvement entre Ecos, R60 et R95 provient en bonne partie de la récolte des branches et de la mortalité. On peut s'interroger sur la pertinence de récolter les branches de diamètre faible et moyen, étant donné les dépenses énergétiques liées et les effets de cette pratique sur les sols et la biodiversité. Encore une fois, les taux simulés sont des moyennes qu'il s'agit de moduler selon les situations (feuillus ou résineux, pente ou plaine, espace rural ou périurbain…)

On constate aussi par ce diagramme que la mortalité influence le puits en 2050 de plusieurs manières :

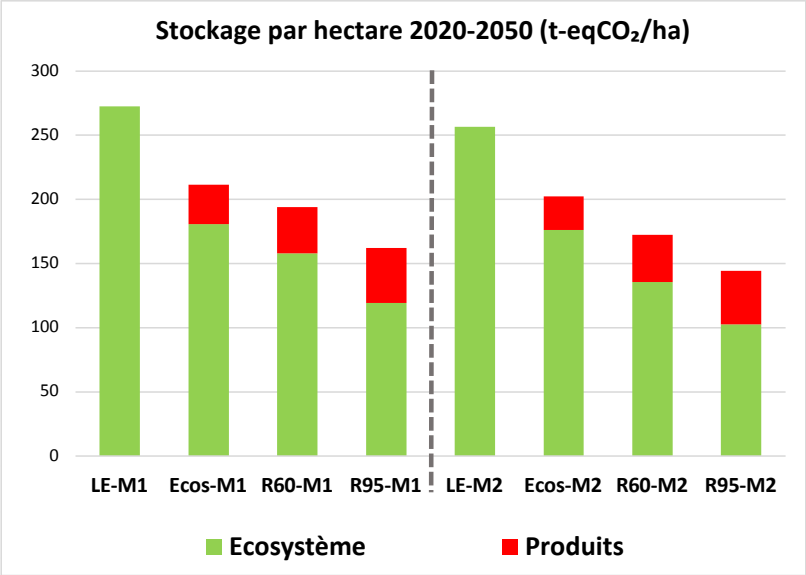
- par le stock de bois mort (supérieur en M2), même si le scénario R95 produit une perte nette du stock de bois mort y compris en M2 ;
- par le stockage de produits-bois et la part de BO dans la récolte (M1 stocke plus et génère plus de BO) ;
- par la différence dans le niveau initial et son rythme d'évolution de M, estimés plus élevés en libre évolution : ce choix méthodologique entraine en M2 une perte nette de bois vivant (Bv), cohérente avec la forte augmentation du stock de biomasse morte. La différence de mortalité entre LE et Ecos est toutefois probable car une gestion forestière « prudente » peut réduire les mortalités en réduisant la compétition interindividuelle. En revanche, si l'on estimait qu'il faut réduire les mortalités en LE, il faudrait symétriquement les augmenter en R95 car une gestion intensive peut provoquer des mortalités non liées à la compétition (mise en lumière brutale, asphyxie racinaire, plaies de débardage…). Ce paramètre est donc important et doit faire l'objet d'une recherche approfondie, même s'il est impossible de prévoir sans faille l'évolution des mortalités.

Dans les scénarios Ecos et R60, les rapports BIBE/BO sont plus faibles que les valeurs réelles actuelles. En effet, toute baisse de prélèvement des branches et du bois mort produit une hausse de la part du bois d'œuvre dans les prélèvements. Toutefois la différence vient aussi, dans les pratiques actuelles, de l'usage en BIBE d'une partie du BO potentiel. La hausse de la mortalité réduit également la part de bois d'œuvre, de sorte que pour un scénario donné, le rapport BIBE/BO est supérieur en M2 par rapport à M1.

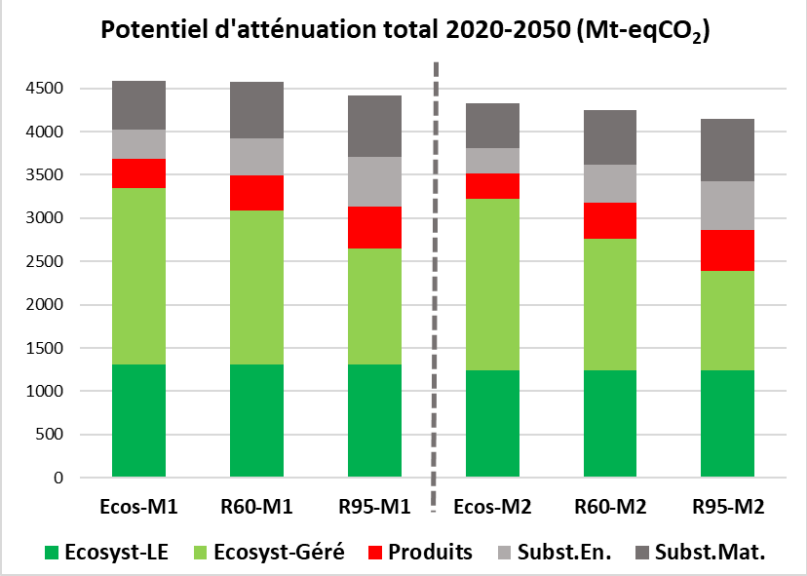
Enfin, avec la méthode décrite au point 4.2.7 nous donnons ci-dessous une estimation du gain potentiel en émissions évitées par la **substitution du bois aux autres énergies carbonées**. Ces émissions évitées représentent entre et 10% (Ecos-M2) et 24% (R95-M2) du total obtenu pour les autres effets de leviers (biomasse et bois-matériau). On constate qu'ajouter le gain potentiel par la substitution-énergie ne modifie pas substantiellement la différence de stockage 2020-2050 entre scénarios : le bénéfice climatique total est d'autant plus élevé que le scénario est extensif en termes de prélèvement.

Bilan Variations de stocks et gain par substitution entre 2020 et 2050

On présente ci-dessous le stockage total par hectare. Même avec les produits bois optimisés et avec nos hypothèse de plus forte mortalité et moindre production en libre évolution, le stockage total (écosystème + produits) est de loin plus efficace en sans exploitation (libre évolution). La mortalité accentuée (M2) ne modifie pas ce constat, le scénario R95 étant encore moins efficace.

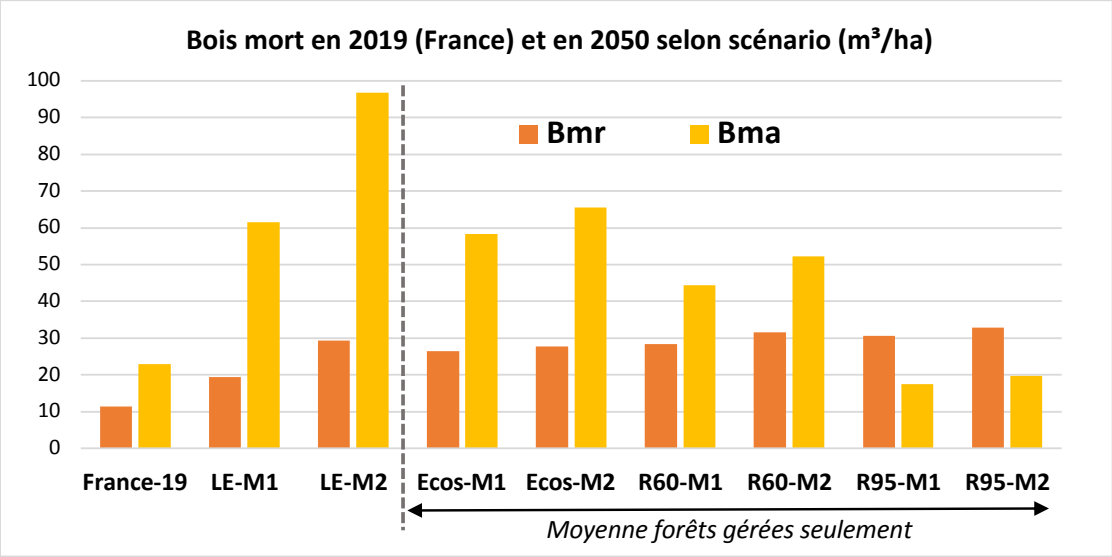


La simulation des effets de substitutions tempère cependant ce résultat. On présente ci-dessous le potentiel d'atténuation global (France) par les « 4S » pour la période 2020-2050 selon le scénario. On constate qu'ajouter le gain potentiel par substitution ne suffit pas à rendre l'augmentation des prélèvements bénéfique pour le climat. Quoiqu'il en soit, dans les deux scénarios climatiques et avec toutes les prudences prises dans ce rapport, le bénéfice climatique total est d'autant plus élevé que le scénario est extensif en termes de prélèvement.



5.3. Quantité et qualité du bois mort

Le diagramme ci-dessous montre les niveaux de bois mort en 2050 selon le scénario de gestion et en libre évolution, en comparaison des niveaux estimés en 2020 (IFN, 2019).



On constate que le volume de bois mort racinaire évolue de manière similaire, même s'il est plus faible en libre évolution avec une mortalité évoluant peu (M1). Ceci est en partie dû à l'hypothèse d'une mortalité de 30% des souches après coupe en sylviculture continue, taux qui demande une analyse plus fouillée. En revanche le volume de bois mort aérien atteint en 2050 montre des niveaux très contrastés. En libre évolution, le volume de bois mort aérien atteint de 63 m³/ha en M1 et 104 m³/ha en M2. En scénario R60-M1, dans les forêts gérées il atteint 42 m³/ha, et en scénario R95-M1 il est réduit à 17 m³/ha en tout. En libre évolution l'augmentation est le simple fait de la mortalité ; en forêt sylviculture continue elle résulte de la faible récolte des arbres morts naturellement et de la récolte partielle des branches ; dans les peuplements en impasse, la baisse est expliquée par la récolte de 75% du volume aérien mort et des branches. C'est dans cette troisième situation que l'on trouve la plus forte charge en bois mort racinaire, du fait de la coupe de tous les arbres du peuplement initial et de la faible survie des souches.

Tous les types de bois mort n'ayant pas le même intérêt pour la biodiversité, mais il est difficile de décomposer nos résultats par qualité. Le bois fort tige est plus présent en libre évolution, tandis que les branches sont plus représentées en sylviculture continue et les souches sont très représentées dans les peuplements en impasse. Le scénario Ecos produit plus de grosses branches et le scénario R95 des menus bois vite décomposés, importants pour la fertilité mais au faible intérêt pour la biodiversité. Il serait donc plus exact de faire varier la durée de décomposition selon le scénario, cette variation diminuant encore le stockage dans le scénario R95.

Selon IFN (2019), en 2018 le stock moyen de bois mort aérien en France serait de 22,9 m³/ha et se décomposerait comme suit :

Type bois mort \ Classe D.	D < 17,5 cm	PB	BM	GB	TGB	Moyenne France
Sur pied + chablis	ns	3,2	2,6	0,8	0,3	6,9
A terre	9,9	2,9	1,3	1,2	0,7	16,0
Moyenne France	9,9	6,1	3,9	2,0	1,0	22,9

Le bois mort à terre et les diamètres inférieurs à 30 cm sont donc largement dominants.

La classification IFN est toutefois peu adaptée à un diagnostic biodiversité, car écologiquement les classes « chablis » et « à terre » se confondent. De plus il est probable qu'en libre évolution le rapport de volume sur pied / à terre soit supérieur à celui des forêts gérées donc des données IFN. N'ayant pas de statistique IFN plus adaptée, on utilise cette répartition pour estimer la part de bois mort sur pied et chablis par rapport au bois mort à terre. En scénario R60-M1 cela donne en 2050 :

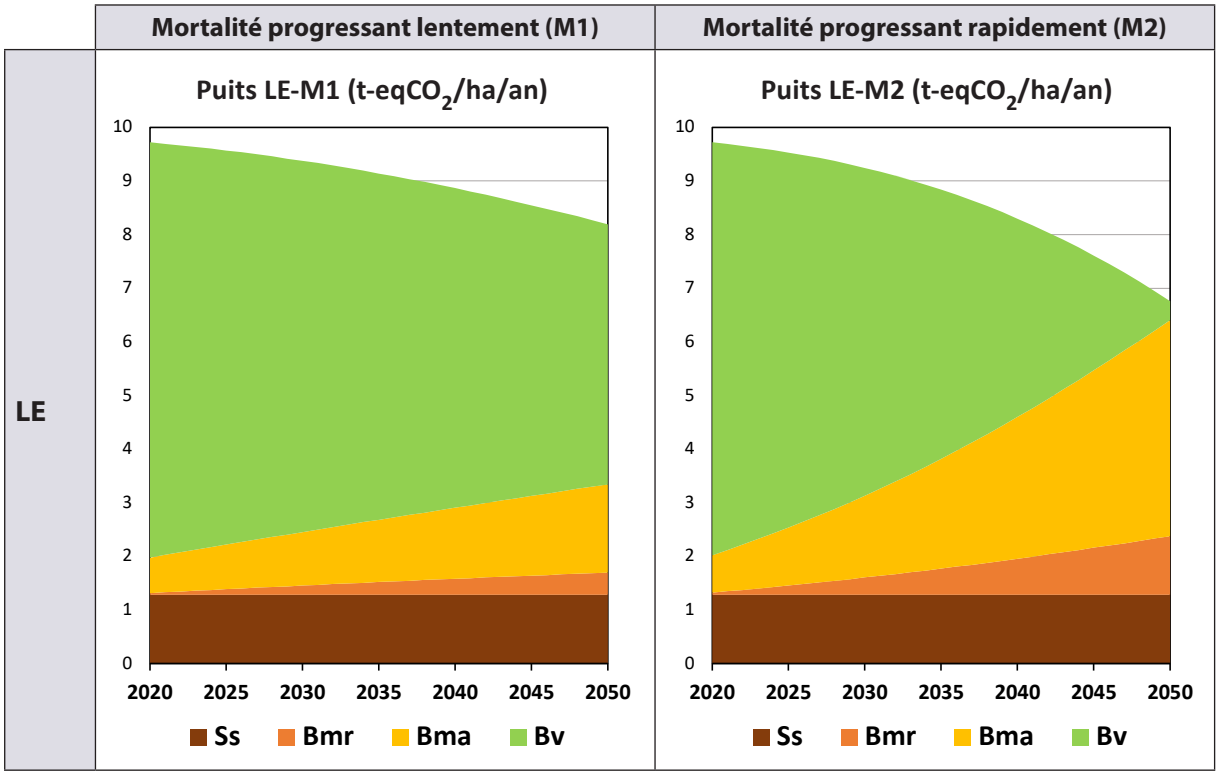
		Bois mort-aérien			
	m³/ha	**sp+chablis**	**à terre**	**total**	**Bm-racines**
Forêts en libre évolution	LE	19	44	63	16
Forêts en sylviculture continue	SC	13	30	42	26
Peuplements en impasse	Imp	3	9	12	32
Forêts françaises	**France**	**14**	**32**	**46**	**24**

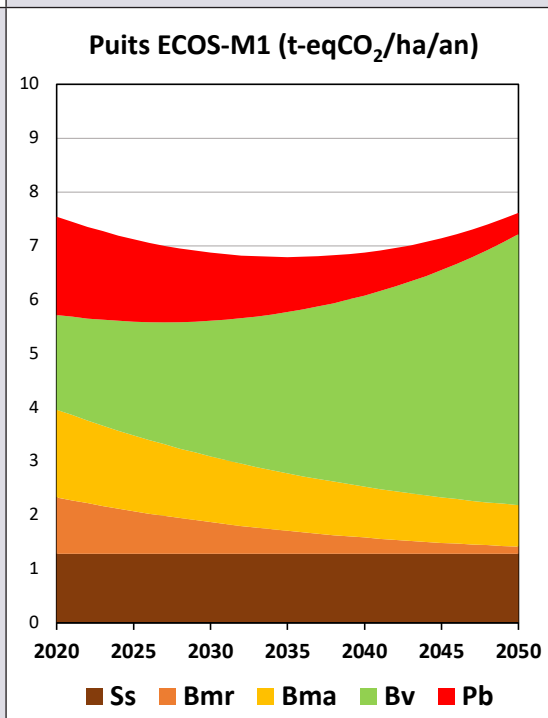
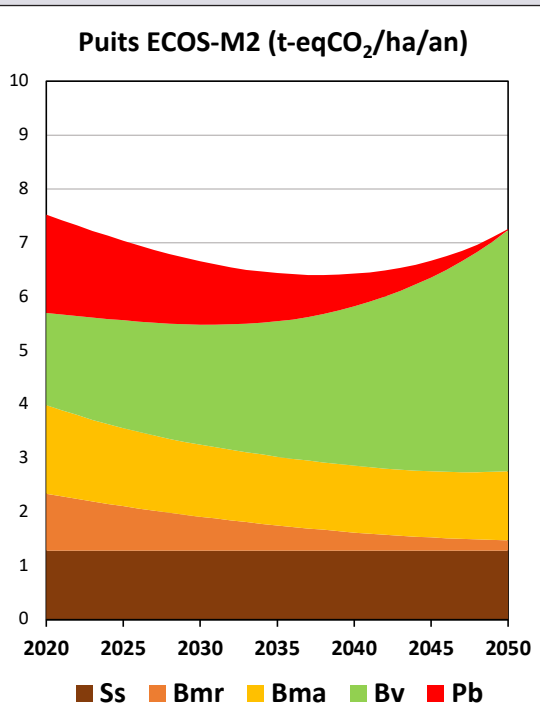
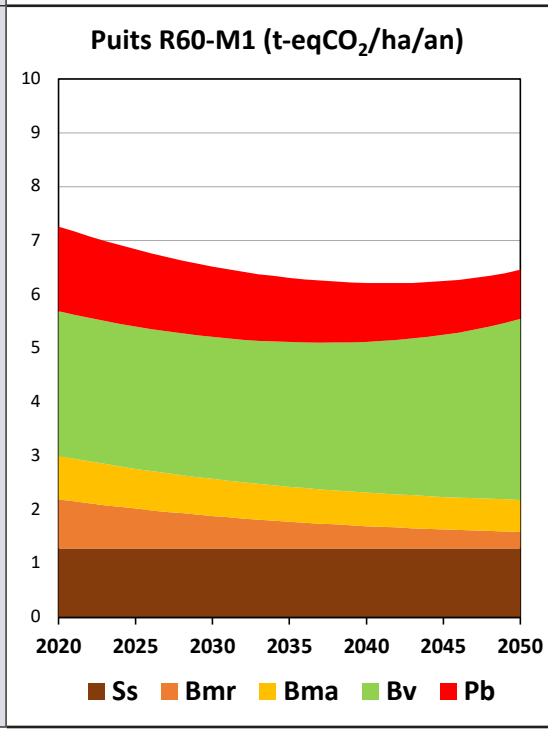
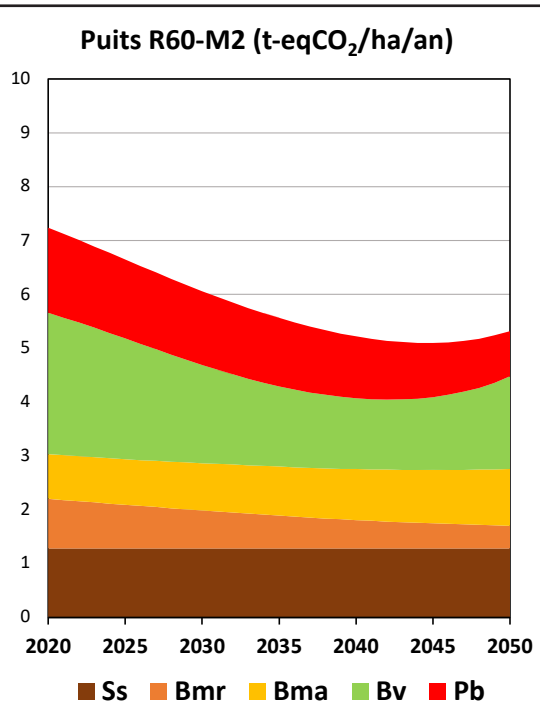
La distribution du bois mort par diamètres ne peut être déterminée, mais la part de gros et très gros bois sera certainement plus élevée en libre évolution qu'en forêt gérée.

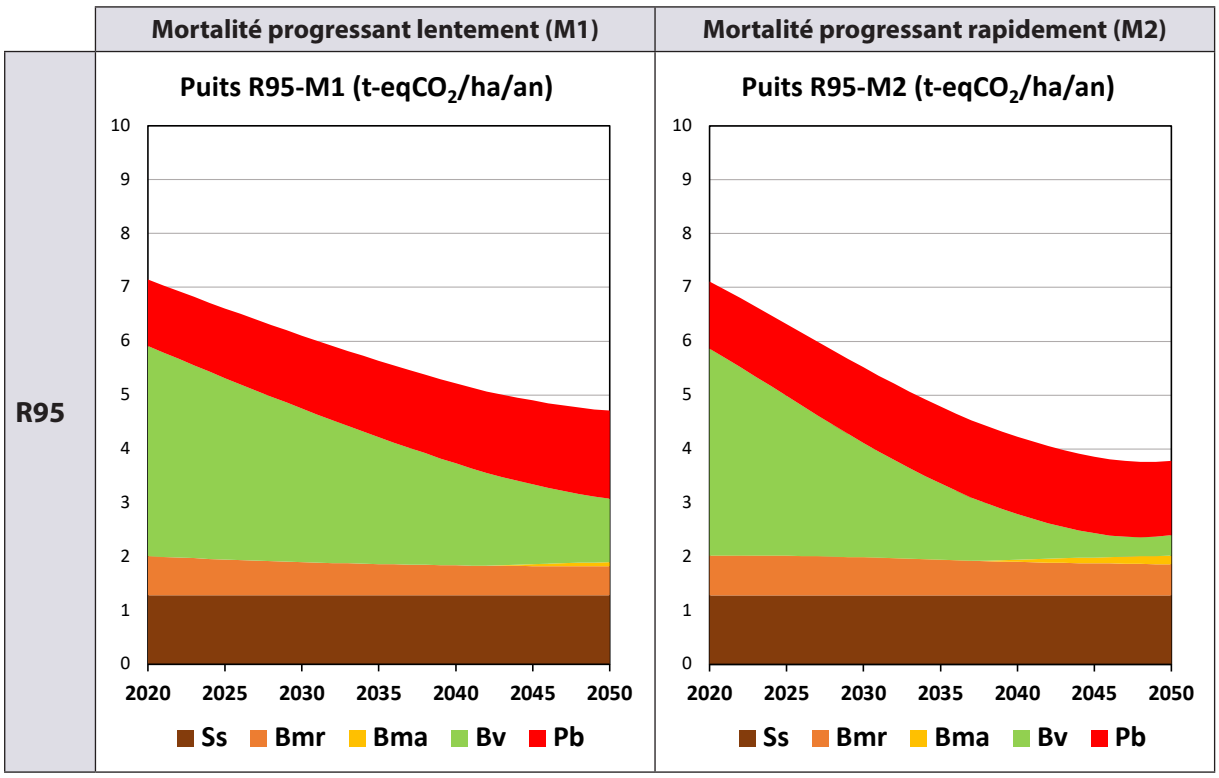
Ce compartiment mériterait des recherches plus poussées.

5.4. Evolution du puits

Le puits désigne le flux annuel net de carbone du système forêt + produits, calculé par différence de stock entre deux années consécutives. Mathématiquement il est donc la dérivée de la fonction décrivant l'évolution des stocks. Pour nos différents scénarios, on obtient les évolutions moyennes par hectare ci-dessous :



	Mortalité progressant lentement (M1)	Mortalité progressant rapidement (M2)
Ecos		
R60		



Hors sol et produits, le puits initial estimé pour la France est estimé à –84 Mt-eqCO_2/an, la somme pour la France donnant –84 Mt-eqCO_2/an, chiffre cohérent avec les estimations actuelles (EFESE, 2019). Cette valeur dépend du rapport CO_2/m^3 retenu (ici 0,93) donc n'est pas absolue. L'écart de puits initial entre scénarios Ecos, R60 et R95 est dû aux produits-bois, l'application du scénario démarrant dès l'année 2020.

En libre évolution sous mortalité M1, entre 2020 et 2050 le puits par hectare diminue légèrement du fait de la diminution progressive de la production nette (production brute – mortalité). Il faut rappeler que ce scénario suppose que les surfaces retenues en libre évolution sont principalement des forêts déjà capitalisées et non des peuplements jeunes, de sorte que la compétition pour les ressources est déjà active. La diminution est plus accentuée en mortalité M2, où le puits de biomasse vivante devient presque nul au profit du bois mort. On approcherait ainsi en 2050 l'équilibre entre production et mortalité, donc un plafond de biomasse vivante, la biomasse totale évoluant encore nettement par apport de bois mort. Cependant, l'augmentation relativement forte retenue pour le taux de mortalité en la libre évolution influence ces résultats.

Dans les forêts gérées, la baisse plus ou moins durable du puits est principalement due à l'exploitation des peuplements classés en impasse, qui entraine aussi une basse du puits de bois mort racinaire par la décomposition des racines.

En Ecos, le puits total augmente du fait de l'arrivée des plantations en production dépassant les pertes par prélèvements, diminuant entre 2020 et 2050. C'est la seule modalité où le puits total en M2 est supérieur à celui de M1, en raison de la plus forte baisse des prélèvements en M2 entre 2020 et 2050. En mortalité accentuée (M2) une gestion s'adaptant aux évolutions naturelles tout en cherchant à réduire la mortalité (Ecos) pourrait ainsi mener en 2050 à un puits annuel supérieur à celui des forêts en libre évolution (LE). Ce résultat toutefois est à prendre avec précaution, car il suppose une mortalité évoluant plus fortement en libre évolution qu'en forêt gérée comme posée au chapitre 3.

Dans le scénario R60 le puits montre une relative stabilité, avec une perspective de faible augmentation grâce aux plantations réalisées après exploitation des peuplements en impasse. En mortalité M2 cette hausse ne parvient toutefois pas à rattraper la baisse du puits de 2020 à 2040.

Dans le scénario R95, le puits diminue continuellement. En 2050 le puits de biomasse vivante est faible mais non nul et le puits généré par l'apport de produits-bois est significatif, mais le puits du bois mort négatif réduit

le flux total. Le puits dans les produits-bois en M2 est inférieur à celui obtenu en M1 en raison de la part inférieure de bois d'œuvre.

En résumé, au regard du flux annuel entre 2020 et 2050, le scénario Ecos semble le plus efficace, le scénario R95 entraine une forte érosion et le scénario R60 maintient le puits actuel. En 2050, le puits total hors sol et produits pour la France aurait perdu 31 Mt-eqCO_2/an, ce qui rejoint l'estimation donnée par le Plan National Intégré Energie Climat.

On notera que par manque de références, nous avons choisi de ne pas faire varier le rythme de stockage de carbone dans le sol, tandis que des différences pourraient apparaitre entre scénario pour ce compartiment, probablement à la défaveur du scénario intensif du fait des mises en lumière accrues de la surface du sol et de l'exploitation des branches et du bois mort, dont une partie alimente le stock sol dans les autres scénarios.

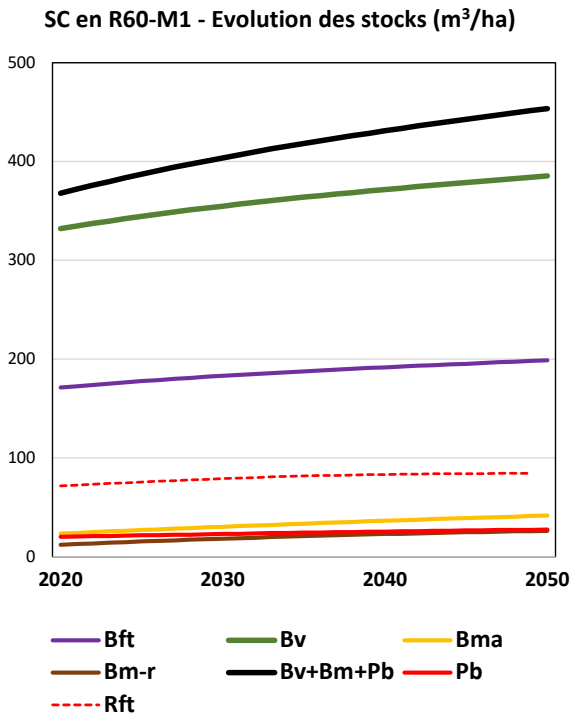
Enfin, le taux de mortalité retenue pour les souches après coupe (50% en SC et 80% en Imp) reste peu documenté. S'il est sous-évalué, les écarts entre scénarios tendraient à se creuser, avec des stockages inférieurs dans les scénarios à fort prélèvement et surtout R95.

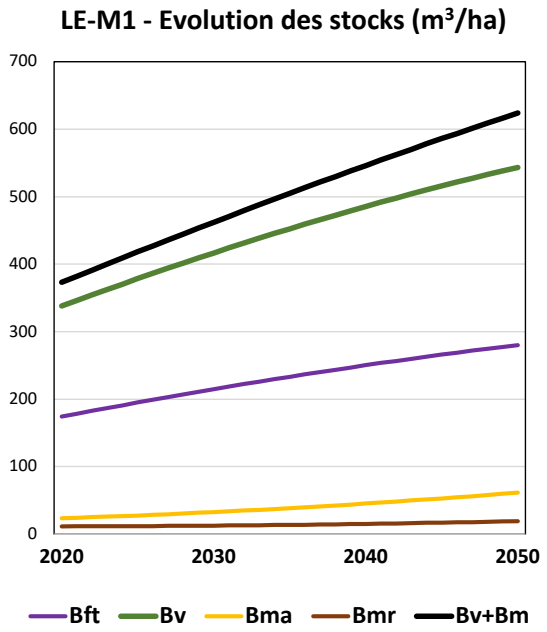
Enfin, on rappelle que ces comparaisons ne mettent pas en lumière les différences potentielles entre des prélèvements par coupe rase et par éclaircie. L'objectif était en effet d'étudier les modulations des taux de prélèvements dans un scénario de gestion global. Or au vu de la littérature (chapitre 2), cette différence de traitement des peuplements pourrait avoir des impacts forts sur les stocks de carbone du sol, en tous cas sur le premier mètre dont les 300 t-eqCO2/ha en moyenne représentent presque 50% du stock total analysé ici. Intégrer ces effets rendrait probablement (encore) le scénario R95 moins intéressant en termes d'atténuation du changement climatique.

5.5. Analyse détaillée du scénario R60-M1 (compromis)

5.5.1. Evolution des stocks par situation de gestion

En moyenne par hectare, l'évolution des stocks par compartiment est très contrastée entre situations comme le montrent les diagrammes ci-dessous.



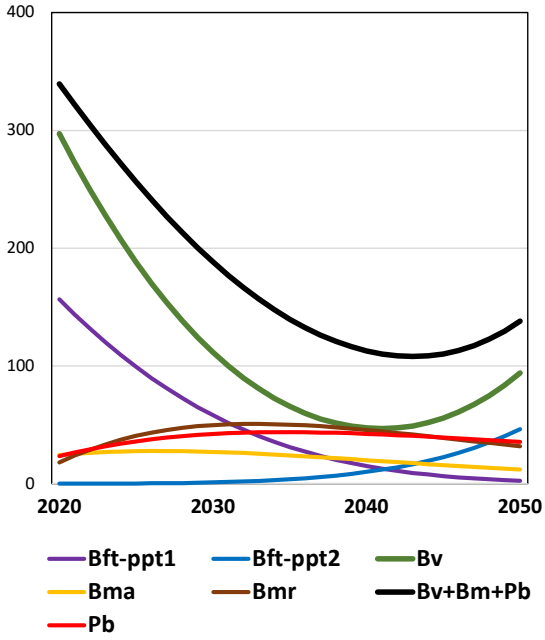


Bft = bois fort tige, Bv = biomasse vivante totale, Bm-a = biomasse morte aérienne (m³/ha) ;
Pb = produits bois (équivalents m3-eq/ha) ; Rft = taux de récolte de la production annuelle nette (%).

En libre évolution, les stocks augmentent fortement y compris pour le bois mort. En sylviculture continue, les stocks évoluent lentement et régulièrement. Le stock de bois mort progresse légèrement. Le stock de produits-bois progresse un peu plus rapidement, mais sa courbe se confond presque avec celle du bois mort au regard des stocks de biomasse vivante largement dominants.

Dans les situations d'impasse, la biomasse vivante chute jusque 2040 (peuplement initial exploité à 90%, jeunes plantations pas encore productives), pour ensuite remonter grâce aux stocks généré par les nouvelles plantations. Le stock des produits-bois augmente d'abord, puis diminue légèrement car l'apport au stock, faible après 2040, ne peut plus compenser les pertes par fin de vie. Le stock de bois mort racinaire suit une courbe similaire pour la même raison. Le stock de bois mort aérien est stable au début puis diminue légèrement du fait de la décomposition des branches laissées au sol (25%) après exploitation des peuplements initiaux.

Imp en R60-M1 - Evolution des stocks (m^3/ha)

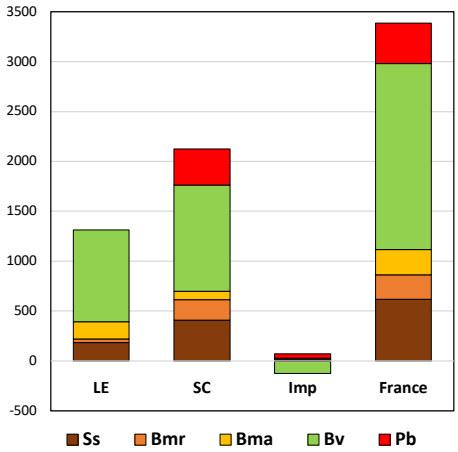


Ppt1 = peuplement initial (en impasse)
Ppt2 = plantation avec exploitation de pp1.

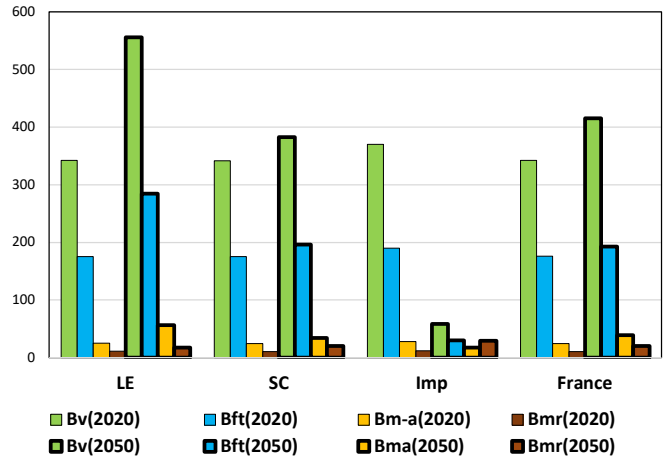
Au total pour la France (diagramme ci-dessous à gauche), le stockage total dans l'écosystème entre 2020 et 2050 se ferait à 49% sur les surfaces en libre évolution et à 51% sur les surfaces en sylviculture continue, puits qui doit compenser la perte nette réalisée sur les surfaces en impasse. Sur cette période les surfaces en impasses génèrent en revanche 15% du bois prélevé, soit par hectare 19 fois plus que les autres surfaces en gestion (on prélève le capital et non l'accroissement). Les volumes/ha (diagramme de droite) augmentent fortement en libre évolution, de manière modérée en sylviculture continue et chutent en impasses (bilan net entre peuplement initial exploité et plantation de remplacement).

Pour les 16 Mha de la forêt française, l'addition des chiffres des trois situations donne un **stockage total de 3,38 Gt-eqCO_2 sur la période 2020-2050** : 55% en biomasse vivante, 15% en nécromasse, 18% en carbone du sol, 12% en produits-bois.

R60-M1 : Stockage 2020-2050 (Mt-eqCO_2)



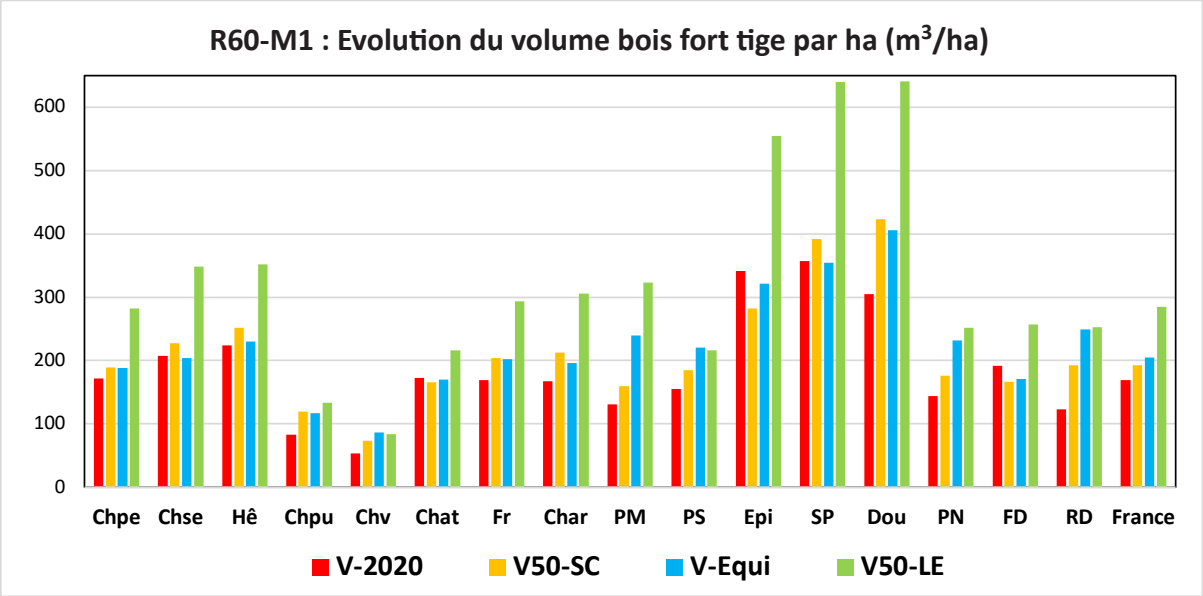
R60-M1 : Evolution 2020-2050 des stocks écosystème (m^3/ha)



LE = Libre Evolution
SC = Sylviculture Continue
Imp = Peuplements en impasses
France = L + SC + Imp

Ss = stock de carbone du sol
Bv = Biomasse Vivante
Bma / Bmr = Biomasse morte aérienne (a) / racinaire (r)
Pb = Stock produits-bois durables
Sm = substitution matériau.

L'évolution des volumes sur pied par hectare est très différente selon les essences, en cohérence avec les taux de prélèvement choisis. Dans le graphique ci-dessous, les stocks augmentent peu pour les essences peu productives ou en situation sanitaire difficile (chêne vert, pin sylvestre, châtaignier, frêne), augmentent fortement pour certaines essences (pin maritime, résineux et feuillus divers) et dépassent 400 m³/ha pour le douglas. Il est toutefois possible que le taux de mortalité augmente plus vite que prévu dans ce calcul pour l'épicéa, peut-être aussi le chêne pédonculé et le sapin pectiné. Pour le douglas, la concurrence pourrait entrainer une augmentation du taux de mortalité en % du volume sur pied. On pourrait ainsi affiner la simulation en faisant varier le facteur d'évolution de la mortalité selon les essences. Mais dans tous les cas ce calcul indique que la forêt française n'est actuellement pas « surcapitalisée et vieillissante ».



Evolution des volumes bois fort tige par hectare pour chaque essence en libre évolution (V50-LE) et en sylviculture continue (V50-SC), au regard du volume initial (V-2020) et du capital d'équilibre en sylviculture continue (V-Equi).

Code des essences : Chpe = chêne pédonculé ; Chse = chêne sessile ; Hê = hêtre ; Chpu = chêne pubescent ; Chv = chêne vert ; Chat = châtaignier ; Fr = frêne ; Char = charme ; PM = pin maritime ; PS = pin sylvestre ; PN = pins noirs ; Epi = épicéa ; SP = sapin pectiné ; Dou = douglas ; RD = autres résineux ; FD = autres feuillus (dont robinier).

Dans les surfaces en sylviculture continue, en 2050 le volume moyen bois fort tige atteint en 2050 serait **199 m³/ha**, soit une hausse de 18% par rapport à la moyenne nationale de 2018. Atteindre le niveau d'équilibre estimé (205 m³/ha) nécessiterait de réduire le prélèvement bois fort tige pour atteindre une récolte totale de 55 Mm³/an en 2050, ou d'augmenter les niveaux de récolte des branches et des arbres morts.

En douglas, épicéa et sapin les volumes atteints en libre évolution sont élevés du capital initial et de la forte production. Cependant vu les évolutions récentes (2018-19), en épicéa ce volume semble peu probable, en lien avec un taux de mortalité sous-estimé (IFN, 2019 et évolution 2020-2050). Il en est peut-être de même dans une moindre mesure pour le sapin pectiné, et même peut-être pour le hêtre et le chêne pédonculé. Ceci rappelle l'utilité d'une estimation plus fine par essence des mortalités 2020 et ultérieures, estimation qui semble toutefois très difficile à réaliser avec les données actuelles.

Par rapport au niveau d'équilibre de chaque essence, certains écarts positifs ou négatifs restent pour certaines, du fait de la difficulté de pouvoir résorber l'écart initial en 30 ans, ceci malgré les fortes évolutions des taux de prélèvements (tableau § 4.2.9). Le volume/ha diminue pour le châtaignier et l'épicéa du fait de la crise sanitaire. Il reste loin du capital d'équilibre en frêne (crise sanitaire), en pin sylvestre et pins noirs (taux de mortalité IFN assez élevé), en pin maritime (forte sous-capitalisation initiale) et en résineux divers (en majorité jeunes). Il dépasse l'équilibre en sapin pectiné et chêne sessile (surcapitalisation initiale) ainsi que légèrement en hêtre (difficultés d'exploitation). Mais la distribution des prélèvements entre essences présentée ici est un choix parmi plusieurs possibles en appliquant le scénario R60-M1.

Il faut rappeler que dans la sylviculture à couvert continu, surface terrière et volume/ha d'équilibre restent des valeurs autour desquelles on cherche à osciller (Pro Silva France, 2014), avec des écarts temporels pouvant être de l'ordre de 20 à 30% même une fois l'équilibre atteint. On rappelle aussi que ce volume d'équilibre estimé est lié aux termes d'exploitabilité choisis et aux surfaces terrières optimales estimées pour chaque essence. Il peut donc être réévalué par l'observation des sylviculteurs et des chercheurs à l'image du réseau AFI (Susse et al., 2009).

5.5.2. Distribution spatiale des prélèvements

Une stratégie globale de gestion et de prélèvements ne détermine pas de la manière dont ces prélèvements se distribuent dans l'espace. Par ailleurs, le prélèvement total constant de 60 Mm^3/an peut masquer de fortes différences entre régions et entre forêts, du fait de la situation de départ, de la productivité et des conditions de mobilisation. Aujourd'hui ces écarts sont importants entre des forêts « abandonnées » (et gérables) et forêts (trop) exploitées. Dans nos calculs le prélèvement initial ne dépasse pas le de prélèvement % actuel estimé, mais en 2020 il résulte de pratiques très diverses, incluant des parcelles non éclaircies d'une part et des déstockages par coupes rases plus ou moins anticipées de l'autre.

Par ailleurs, garder un prélèvement total constant de 60 Mm^3/an pourrait se faire avec une récolte de branches et de bois mort supérieure à celle proposée dans ce scénario « compromis », ce qui mènerait à des niveaux 2050 de bois fort tige supérieurs et de bois mort inférieurs.

Il est difficile d'estimer le niveau actuel de prélèvement des branches et du bois mort :

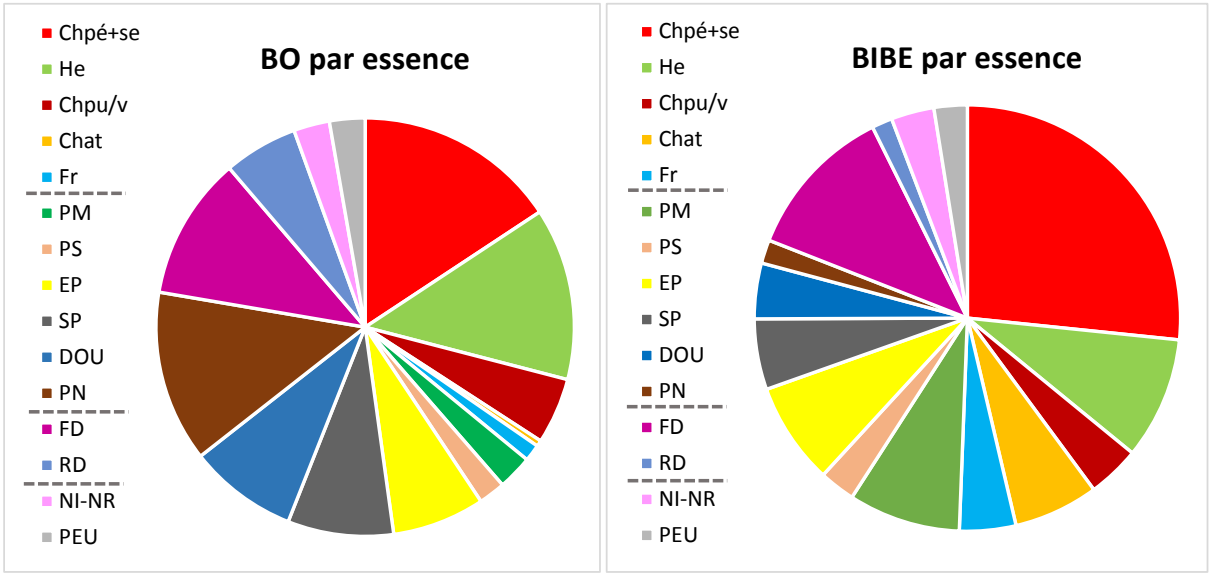
- Pour les branches, on peut l'estimer grossièrement à partir de la récolte actuelle des branches estimée à 15 Mm^3/an (Récolte totale - Récolte Bft), pour une production sur la surface aujourd'hui gérée (§ 2.2.1) d'environ 80 Mm^3/an en tout et 27 Mm^3/an de branches : les branches seraient en 2019 prélevées pour environ 55%, ce qui parait vraisemblable. Le scénario Ecos constitue donc une forte baisse de ce taux, le scénario R60 une faible baisse et le scénario R95 une forte hausse.
- Pour le bois mort, on ne dispose pas de chiffres de prélèvement donc il est difficile de comparer nos scénarios à la réalité actuelle. Toutefois il est probable que sur les forêts gérées, le taux actuel soit de l'ordre de 50%, donc que R95 constitue une augmentation et les deux autres scénarios une forte diminution. Il est certain que maintenir 75% de prélèvement du bois mort sur toutes les forêts gérées mènerait, dans ces forêts, à une division au moins par 3 du stock par hectare de bois mort, donc d'importantes conséquences pour la biodiversité.

Ainsi, diminuer le prélèvement des branches et arbres morts imposera une meilleure répartition des prélèvements dans l'espace et le temps pour permettre un prélèvement de 60 Mm^3 en 2020 ; cette répartition des prélèvements dans l'espace et le temps est une caractéristique majeure de la sylviculture continue. Mais il est certain qu'appliquer de tels scénarios imposerait une période de transition et une volonté politique claire.

Ces simulations sont réalisées dans le cadre d'une sylviculture évitant les coupes rases à part dans les peuplements jugés impasses, qui par définition, répartit mieux les prélèvements dans l'espace et le temps que la futaie régulière ou le taillis simple. Ainsi des variations modérées dans la distribution spatiale des prélèvements (par région, par type de peuplement) ne devraient pas significativement affecter les résultats. Le scénario proposé est conçu pour éviter les écarts de taux de prélèvements entre forêts intensivement gérées (ex. domaniales et grands domaines privés) et forêts « abandonnées » (petite forêt privée, qui souvent font tout à coup l'objet d'un prélèvement excessif). Pour établir un scénario national vraiment réaliste tenant compte des disparités régionales, il conviendrait donc de construire une stratégie à une échelle la plus locale possible, selon les données disponibles et leur fiabilité. Plus l'analyse descendra dans le détail des régions, plus les paramètres devront être modulés donc plus il y aura de scénarios possibles, d'où la nécessité d'un travail décentralisé et collectif. Mais cette approche plus ciblée permettrait de définir plus finement les volume/ha d'équilibre et les termes d'exploitabilité de chaque essence dans un contexte donné. Elle permettrait de confronter la stratégie nationale (démarche descendante) avec l'addition de stratégies régionales (démarche ascendante), pour parvenir à une coordination avec les deux.

5.5.3. Récoltes et stocks de produits générés

Les volumes estimés de différents produits ont été donnés au § V.2. Les diagrammes suivants présentent la ventilation des volumes BO et BIBE par essence. Il est important de rappeler que ces ventilations peuvent varier selon les choix de distribution d'un objectif de prélèvement donné entre essences.



Code des essences : Chpé = chêne pédonculé ; Chse = chêne sessile ; He = hêtre ; Chpu = chêne pubescent ; Chv = chêne vert ; Chat = châtaignier ; Fr = frêne ; PM = pin maritime ; PS = pin sylvestre ; PN = pins noirs ; EP = épicéa ; SP = sapin pectiné ; DOU = douglas ; FD = autres feuillus (dont charme et robinier) ; RD = autres résineux.

La récolte totale est composée de 43,3% de BO et 56,7% de BIBE, soit un **rapport BIBE/BO de 1,31**. Cette valeur faible au regard des ratios classiques de 1,65 (MTES, 2018a) à 2,10 (FCBA, 2019), qui supposent que un quart du bois d'œuvre potentiel selon l'IFN est utilisé en BIBE. Par rapport à la réalité actuelle, notre scénario prévoit de valoriser nettement plus de BO potentiel en feuillus. La différence résulte aussi du choix de prélever peu de branches et de ne pas prélever la mortalité naturelle. Un effort conséquent est dans tous les cas à réaliser pour ne pas gaspiller le potentiel des bois feuillus.

Par comparaison, le scénario R95-M1 donne un rapport BIBE/BO de 1,79 même avec notre hypothèse de valorisation optimale du BO potentiel, ce qui indique une augmentation du bois-énergie, donc moins de produits stockant plus de carbone durablement.

Quoiqu'il en soit, une valorisation réduite du BO potentiel aurait des implications sur les prévisions d'évolution des stocks de carbone, à la défaveur des scénarios de fort prélèvement. En effet, si dans la réalité la valorisation des BO est inférieure, le stockage dans les produits sera réduit, ce qui accentuera les différences entre les scénarios Ecos, R60 et R95.

Avec ce scénario et les paramètres détaillé au chapitre 4, les forêts gérées **génèrent entre 2020 et 2050 un stock de bois d'œuvre durable de 0,43 Gm³, ce qui correspond à 0,40 Gt-eqCO_2**. Ce stock est représenté par 48% de feuillus, 48% de résineux et 4% de peupliers.

5.5.4. Arbitrages sur les usages du BIBE

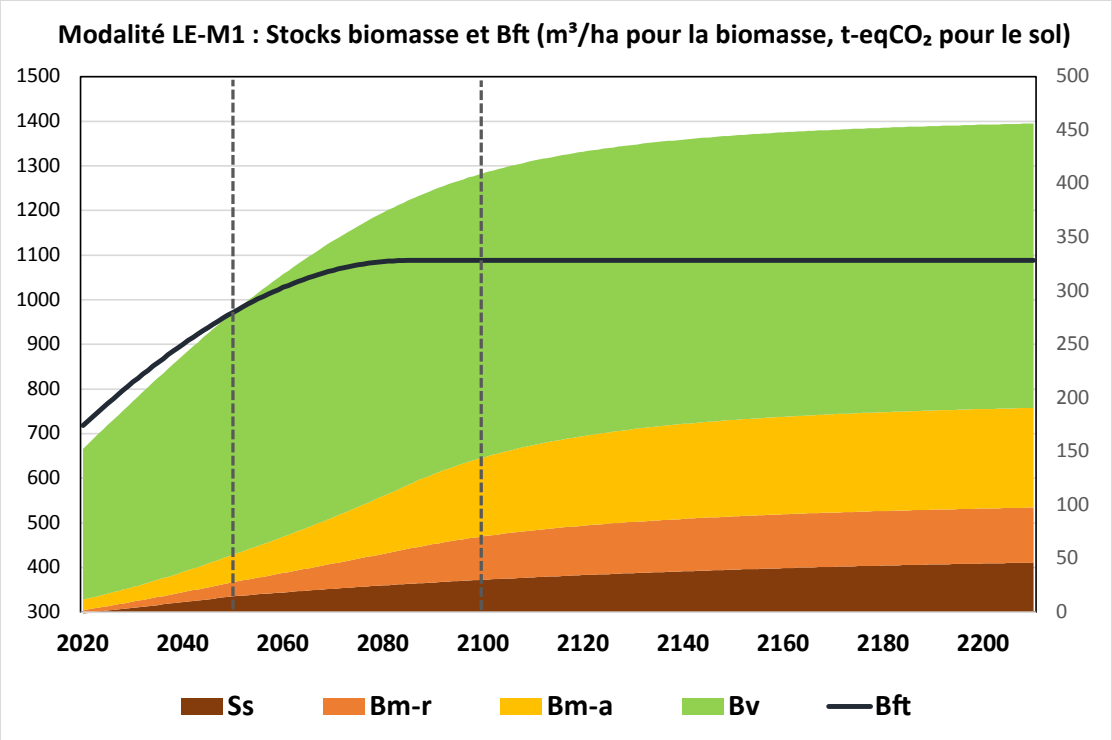
Sur les 44,5 Mm³/an destinés au BE entre 2020 et 2050, des conflits d'usage importants risquent d'apparaitre entre les débouchés classiques du BIBE (papier, panneaux, bois-énergie, piquets et poteaux, matériaux isolants à base de bois), mais également avec ses usages émergeants (biocarburants dits avancés à base de bois, biogaz, chimie issue du bois). Pourtant, nous avons vu que le bois d'œuvre potentiel est déjà partiellement transformé en BIBE. De plus, certaines études estiment que la part de bois d'œuvre dans la récolte totale pourrait encore augmenter pour dépasser 50% (Angerand et al., 2014), ce qui semble logique dans une sylviculture d'amélioration.

Avec un scenario ambitieux de rénovation/construction biosourcés, le volume de bois nécessaire à la fabrication de panneaux de bois en 2050 est estimé à 24 Mm^3 de sciages, pour 7 Mm^3 de panneaux constructifs et 2 Mm^3 de panneaux isolants (Angerand et al., 2014). La récolte potentielle de BO estimée entre ci-dessus est donc nécessaire, de même que les 5 Mm^3 (15% du BIBE) destinés aux usages durables du BIBE. Il faut craindre que non seulement le bois de construction potentiel ne soit pas valorisé à sa juste valeur, mais que la proportion « gaspillée » en bois-énergie et usages émergents soit croissante. Or, orienter la sylviculture vers la production de BIBE irait clairement à l'encontre de la hiérarchie des usages et de l'amélioration des forêts françaises (Pro Silva France, 2012a ; WWF, 2016).

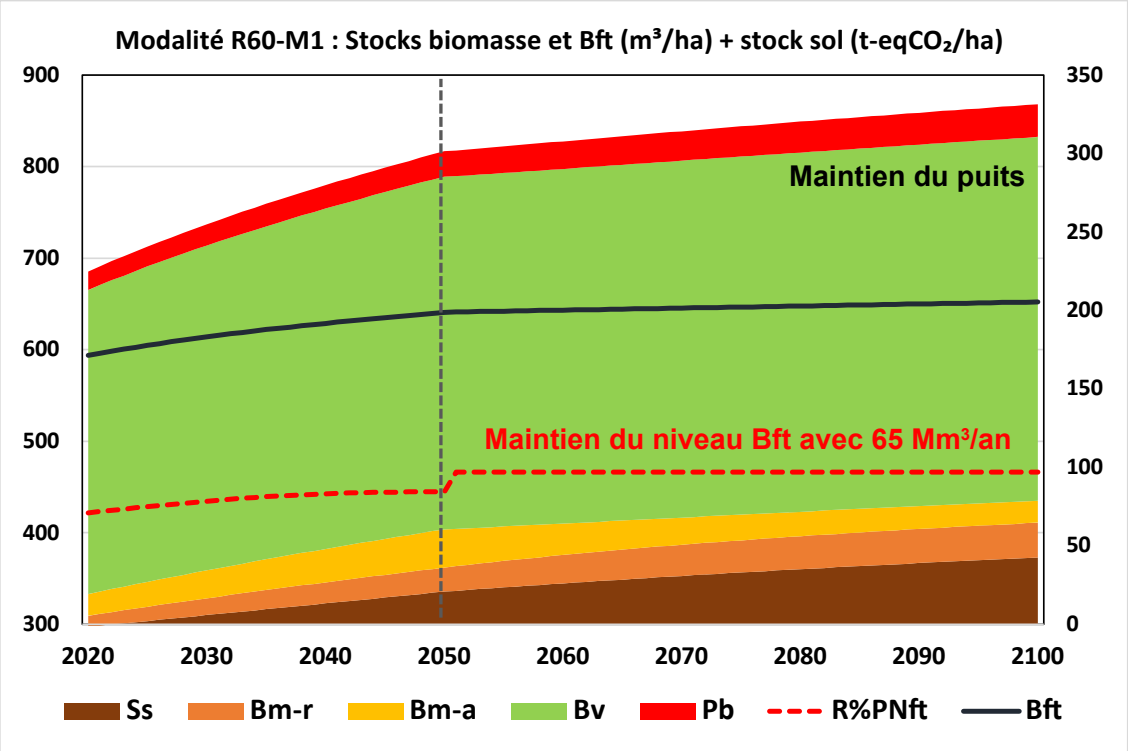
5.6. Perspective 2050-2100

Dresser une perspective de l'évolution des stocks au-delà de 2050 est encore plus difficile que sur la période 2020-2050, du fait des incertitudes climatiques liées en particulier aux comportements des sociétés interagissant aujourd'hui avec le climat. Pourtant, imaginer cette perspective avec des hypothèse claires permet de visualiser l'influence potentielle des paramètres essentiels à long terme. C'est pourquoi nous avons fait tourner le modèle PRM pour la situation Sylviculture Continue, en supposant le maintien de la production brute actuelle et une mortalité stabilisée à son niveau de 2050. Dans ce cadre précis, les trois situations de gestion sont étudiées et présentées ci-dessous. Nous ne figurons pas l'effet de substitution car son évolution dépend d'un nombre encore plus grand de paramètres. Pour le stock du sol (Ss), nous avons supposé qu'au-delà de 2050 le puits se réduisait de 1% par an, pour se stabiliser vers 2200 autour de 412 t-eqCO_2/ha.

En libre évolution, le taux annuel de mortalité se stabiliserait à 1,63%, avec un apport annuel de 5,34 m^3/ha/par an. A l'horizon 2100, le stock total serait encore en nette croissance, donc nous figurons l'évolution simulée à l'horizon 2200. Sous ces hypothèses, le puits de la biomasse vivante se maintiendrait jusque vers 2100, et le puits total ne serait pas nul avant 2200 ; le stock total atteindrait un plateau asymptotique vers 2200 avec 641 m^3/ha de biomasse aérienne vivante pour 328 m^3/ha bois fort tige (trait bleu, valeurs à droite), 231 m^3/ha de bois mort aérien et 127 m^3/ha de bois mort racinaire. Bien entendu la valeur et le moment de stabilisation du taux de mortalité dépendent de l'évolution climatique et biotique, donc ces chiffres ne sont qu'indicatifs. Mais cette simulation suggère que la forêt française est aujourd'hui bien loin d'un équilibre entre production et mortalité et d'un puits de carbone nul.



En forêts gérées sous scénario R60-M1, le taux de mortalité serait stabilisé à 0,61% à partir de 2050 et l'on obtiendrait le diagramme ci-dessous. On constate d'emblée que le prélèvement de bois accélère nettement l'arrivée du plateau asymptotique fixant le niveau maximal et réduit ce niveau, en dépit des plus faibles mortalités supposées en forêt gérée. Les paramètres choisis sont discutables mais dans tous les cas, ce diagramme indique que la forêt française n'est en 2019 pas « surcapitalisée et vieillissante » comme elle est parfois présentée par rapport à la libre évolution.



Légende : compartiments de stocks et codes-couleur : comme les autres diagrammes, voir légende en haut de ce chapitre ; R%PNft = taux de récolte de la production nette bois fort tiges (%) ; Bft = niveau de bois fort tige (m³/ha).

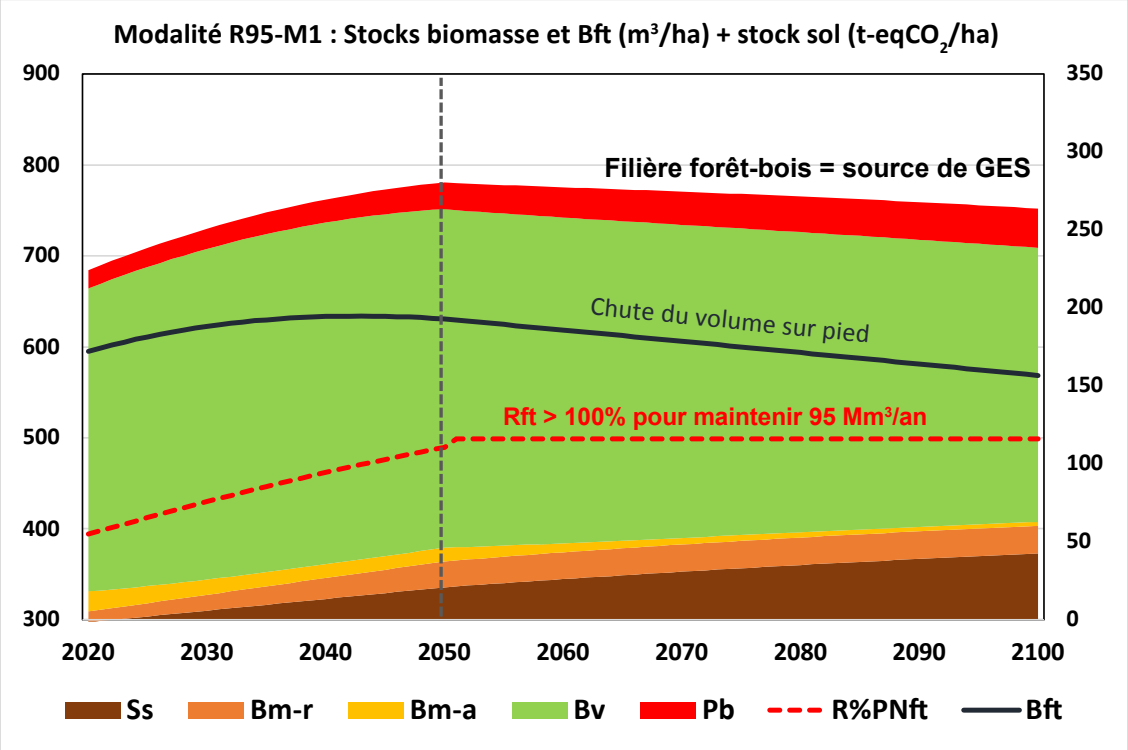
Sous les hypothèses posées ci-dessus, le prélèvement pourrait augmenter jusqu'à atteindre le capital d'équilibre, puis passer à 97% de la production nette en maintenant ce niveau de bois fort tige, sans changer les taux de récolte des branches et du bois mort afin de respecter la fertilité des sols et la biodiversité. La récolte pourrait alors passer à 65 Mm³/an sans variation de stock si la mortalité n'augmente pas. En 2100 le stock serait composé de 398 m³/ha de biomasse vivante, 24 m³/ha de bois mort aérien, 40 m³/ha de bois mort racinaire et l'équivalent de 47 m³/ha de produits-bois soit 560 Mm³ pour la France. Le stock total continuerait à augmenter sous par le compartiment sol et secondairement par les produits durables. Une durée de vie moyenne du bois d'œuvre de 200 ans ferait passer le stock de produits à 68 Mm³/ha à l'équilibre (820 Mm³ pour la France), soit 15% du stock total sans considérer le compartiment sol ou 9% du stock (eq-CO_2) en considérant le sol : même avec de très longues durées de vie, la contribution des produits-bois et même de leur gestion est mineur par rapport à la biomasse.

Cette évolution positive du prélèvement serait possible à condition de répartir les prélèvements de manière homogène entre les forêts gérées. Vu la répartition actuelle inégale des prélèvements, comme nous l'avons vu cela imposerait en 2020-2050 très probablement une baisse temporaire des prélèvements sur les forêts les plus faciles à exploiter (domaniales en plaine, grandes forêts privées faciles d'accès), pendant le « rattrapage » sur les forêts nouvellement mises en gestion.

Avec une forte évolution de la mortalité (M2), le prélèvement de 60 Mm³/an ne pourrait pas être maintenu au-delà de 2050 sans chute du volume bois fort tige par ha, à moins de prélever plus de branches et/ou de bois mort.

Le scénario Ecos est naturellement intermédiaire entre ces deux évolutions. Il est écologiquement très pertinent, mais nous ne l'approfondissons pas ici car il semble très difficile à appliquer pour l'avenir (crise de filière, perte d'emplois principalement en régions rurales fragiles, hausse des imports de bois …).

Pour le scénario R95, avec la même évolution de la mortalité qu'en scénario R60 on obtient le diagramme ci-dessous.



Entre 2020 et 2050 le prélèvement montre pour atteindre 95 Mm³, en dépassant la production nette. Ensuite, pour maintenir ce niveau de prélèvement il faudrait déstocker progressivement la forêt française, pour revenir à un volume bois fort tige de l'ordre de 168 m³/ha en 2100, qui chuterait encore après cette échéance si on maintient le prélèvement. Malgré le maintien du stockage dans le sol, ce scénario R95 mènerait à une annulation progressive du puits total. Dans cette perspective, en 2100 les stocks (non stabilisés) se composeraient de 325 m³/ha de biomasse vivante, 5 m³/ha de biomasse morte aérienne, 34 m³/ha de biomasse morte racinaire et 53 m³/ha de produits-bois. Le stockage de produits-bois dépasse celui du scénario précédent, mais les pertes sur les autres compartiments sont largement supérieures.

Ce scénario intensif (R95) aurait des conséquences fortes sur les écosystèmes, car il impose :

- une récolte accrue des branches et de la mortalité naturelle, pouvant impacter significativement la biodiversité et la fertilité des sols (Achat et al., 2015a-2015b, cfr chapitre 2), d'autant plus la majorité des forêts productives en France sont situées sur des sols acides (IFN, 2015).
- un stock de bois mort aérien très faible et nettement insuffisant au regard des seuils nécessaires à la préservation de la biodiversité (Vallauri et al., 2010) et pour favoriser la lutte biologique contre les parasites et ravageurs ;
- une réduction des termes d'exploitabilité pour maintenir 95 Mm³/an, donc la perte de gros et très gros bois en forêt, avec des conséquences écologiques et paysagères connues, mais aussi des difficultés de régénération naturelle compliquant fortement la pratique de la sylviculture continue.
- un prélèvement dépassant la production nette à partir 2044 environ pour compenser la mortalité, ce qui produirait une chute progressive des volumes sur pied, qui fragiliserait les écosystèmes et compliquerait la pratique de la sylviculture continue, imposant probablement la plantation sur la majorité des forêts gérées ;

Le scénario R60 pourrait ainsi constituer un compromis intéressant, entre besoins de la société et préservation des écosystème et de leur puits de carbone. Dans ce scénario, le maintien du niveau actuel de prélèvement ne signifie pas que très peu de forêts de France pourraient faire l'objet de prélèvements supplémentaires, mais que la hausse de prélèvement dans certaines forêts sans gestion (blocages levés) devrait être compensée par une baisse dans des forêts déjà intensément exploitées. Cet équilibrage ne serait possible que progressivement, grâce à des efforts de regroupement et d'équipement permettant d'augmenter les surfaces en gestion. En effet, on rappelle que tous les scénarios étudiés dans ce rapport supposent une surface gérée évoluant de 65% en 2020 à 75% en 2050, donc que leur application nécessiterait, sur 1,6 Mha, un important effort de d'équipement (routes, pistes) et de déblocage des verrous fonciers (regroupement et/ou remembrement, communication et aides à la gestion…).

5.7. Synthèse des déterminants du puits

Nous tentons ici de synthétiser les facteurs influençant le rôle des forêts et du bois dans l'atténuation du changement climatique.

Après avoir gagné en surface et en volume pendant près de deux siècles, la forêt française se dirige progressivement vers un équilibre asymptotique dans son niveau de biomasse par hectare. Mais le volume par hectare à l'équilibre (maximum) et le délai pour y arriver sont inconnus et dépendront de plusieurs facteurs.

Pour une production brute constante, les paramètres les plus déterminants de l'évolution des stocks sont les taux de prélèvement et de mortalité, ce qui parait évident vu l'équation de base de l'évolution de la biomasse vivante ($\partial Bv = P - R - M$). Mais les stocks comportent également un compartiment bois mort (Bm) et un compartiment produits-bois (Pb), de sorte que :

- pour une mortalité donnée, le stock de bois mort dépend de sa durée de décomposition en forêt, donc de la nature des bois morts et du micro-climat forestier (Hagemann et al., 2010 ; Vanderhoof et al., 2012) ;
- pour un prélèvement donné, le stock de produits-bois dépend de la durée de vie des produits dans la filière.

Toutefois, le stockage dans les produits n'aura une importance vraiment significative qu'à long terme (>2050), tandis que le déstockage dans l'écosystème par les prélèvements et en particulier le remplacement total (impasses) se marque à court terme. Un taux de prélèvement supérieur augmentera le stockage dans les produits, mais diminuera le stockage dans l'écosystème, donc ne sera bénéfique que si la durée de vie des produits est très élevée, et même dépasse largement la durée de survie des arbres récoltés, ce qui parait à priori difficile à réaliser. L'option retenue pour les impasses (remplacement) déstocke massivement l'écosystème et ne peut se justifier qu'en cas de dépérissement entrainant de facto une durée de vie faible du bois en forêt.

Le niveau de plafonnement des volumes sur pied ainsi que les parts respectives de bois mort et vivant dans les stocks dépendent étroitement des taux de prélèvement (tige, branches) et des taux de mortalité naturelle retenus. Les prélèvements peuvent être ajustés par les gestionnaires pour préserver le capital (volume et micro-climat), mais la mortalité sera déterminée principalement par les évolutions climatiques, même si les coupes peuvent l'influencer. Une hausse forte et rapide des mortalités pourrait accroire les surfaces en impasse (scénario M2) ; une hausse modérée et progressive pourrait, du moins jusqu'à un seuil à définir, être tempérée par le micro-climat du couvert forestier maintenu.

Dans nos calculs, même en scanario climatique favorable (RCP 2.6) le taux de mortalité augmente de manière géométrique pour refléter l'augmentation de la compétition inter-individuelle pour les ressources (limitées). Toutefois, la prospection de nouveaux espaces racinaires, la complémentarité des niches et les relations positives entre individus et entre espèces pourraient retarder cette hausse du taux de mortalité, donc la phase d'équilibre. De plus, la mortalité en m^3/an n'augmente significativement qu'avec des volumes/ha élevés. Il reste donc à savoir si à long terme, une gestion forestière prudente peut réellement réduire le taux de mortalité en limitant la compétition entre arbres, ce qui permettrait d'obtenir un volume maximal élevé malgré les

prélèvements. Cet effet « bénéfique » semble assez évident pour nombre de forestiers, mais n'est biologiquement pas acquis. Une sylviculture dite « dynamique » comme elle a été promue dans de nombreuses régions depuis 30 ans, pourrait même fragiliser les peuplements sur le plan biologique en créant du stress, même si les arbres sont mécaniquement plus stables. Pour étudier ces facteurs, il serait intéressant de comparer les mortalités dans des scénarios d'absence de prélèvement, de prélèvement « doux » (prélèvement d'arbres très concurrencés) et de prélèvement intensif (mise à distance).

En résumé, l'intérêt climatique d'un prélèvement sur l'évolution des stocks devra être étudiée au regard des productions brutes, des taux de prélèvement et de mortalité, mais aussi des durées de décomposition en forêt et des durées de vie des produits. A long terme, l'évolution de la fertilité des sols et de la biodiversité pourront aussi affecter la biomasse par un impact sur la productivité et les capacités de régulation sanitaire des écosystèmes. Les stratégies doivent donc prendre en compte tous ces paramètres.

On peut résumer l'influence des facteurs sur le stockage de carbone par l'effet de l'augmentation de chacun des paramètres (les autres étants supposés constants), l'effet résultats de la substitution étant mis entre parenthèses :

Paramètre croissant		Bv	Bm	Pb	Sm	Puits total	Autres effets
Production de biomasse (P)		↑	→	↑	(↑)	↑	Fertilité (–)
Mortalité de la biomasse (M)		↓↓	↑	→	→	↓	Biodiversité (+)
Récoltes	Tige (R_{bft})	↓↓	→	↑	(↑)	↓	Fertilité (–)
	Branches (R_{br})	→	↓	→	→	↓	Fertilité (–)
	Mortalité (R_m)	→	↓	→	→	↓	Biodiversité (–)
Durée décomposition du bois mort (DD)		→	↑	→	→	↑	Biodiversité (+)
Durée de vie du bois d'œuvre (DV)		→	→	↑	(↑)	↑	Selon le cas
Emissions amont de la filière		→	→	→	↓	↓	Selon le cas

Pour stocker un maximum de carbone dans le système forêt-produits, on aura intérêt à :

1) Réduire tant que possible la mortalité naturelle en évitant les chocs micro-climatiques, les plaies aux organes aériens, les stress racinaires, l'érosion physique et chimique des sols les monocultures fragiles sur le plan sanitaire ;

2) Augmenter la durée de décomposition du bois mort en stabilisant le micro-climat ;

3) Augmenter la durée de vie des produits par optimisation de la hiérarchie des usages ;

4) Limiter les prélèvements surtout de branches (aucun prélèvement de souches) ;

5) Réduire les émissions de la filière pour maximiser les coefficients de substitution matériau.

5.8. Comparaison avec d'autres scénarios

L'effet négatif de l'augmentation des prélèvements sur le stockage de carbone en France a été montré par plusieurs études récentes (Valade et al., 2017 ; Roux et al., 2017 ; Martel et al., 2018 ; Ademe et al., 2018). Ce constat commun interroge donc fortement les programmes d'augmentation des prélèvements au regard du rôle de la forêt dans l'atténuation du changement climatique.

Comme expliqué au chapitre 3, le niveau actuel de prélèvements estimé à 60 Mm^3 bois total hors pertes d'exploitation repose sur l'analyse des enquêtes de branche pour les volumes commercialisés, une estimation des volumes de bois autoconsommés et une estimation des pertes d'exploitation. Avec une marge d'erreur estimée

à 10%, ce prélèvement total se décompose en 20 Mm^3 de bois d'œuvre, 11 Mm^3 de bois d'industrie, 8 Mm^3 de bois énergie commercialisé et 21 Mm^3 de bois énergie hors enquête de branche (FCBA, 2018). Le ratio BIBE / BO est estimé à 1,65. Or depuis le Grenelle de l'Environnement (2007) et le discours de M. Sarkozy à Urmatt (2009), la possibilité d'augmenter fortement les prélèvements oriente les politiques forestières. Ainsi plusieurs études récentes (Ademe et MAAF en 2009, DGEC en 2014) affirment que la forêt française pourra (ou devra) supporter une augmentation importante des prélèvements. En 2014, la loi d'avenir pour l'agriculture, l'alimentation et les forêts a fixé un nouveau cadre de politique forestière avec le Programme National Forêt Bois. En s'appuyant sur l'argument d'une sous-exploitation de la forêt française, ce programme fixe un objectif de mobilisation de 72 Mm^3 de bois à l'horizon 2026 (PNFB, 2016), soit dans 7 ans seulement.

Une première Stratégie Nationale Bas Carbone a été adoptée en 2015 (MTES, 2015) et une révision est actuellement en cours (MTES, 2018a). Dans la version actuelle de la SNBC, le puits de carbone des forêts (hors sol et produits) est estimé en 2014 à environ –65 $MteqCO_2$/an. A l'horizon 2050, il évoluerait à –85 $MteqCO_2$/an pour le scenario « avec mesures constantes » (sans changement de pratiques) et à –54 $MteqCO_2$/an pour le scenario avec des mesures d'intensification, soit un écart de 31 $MteqCO_2$/an entre les deux scénarios. Dans le projet de Plan National Intégré Énergie Climat (MTES, 2019), le puits de carbone forestier à l'horizon 2050 est estimée à –32 $MteqCO_2$/an, soit une division par deux du puits actuel.

Ni dans la Stratégie Nationale Bas Carbone, ni dans le projet de Plan National Intégré Énergie Climat, ne sont précisés la relation entre diminution du puits de carbone et augmentation de la récolte de bois. Il est toutefois mentionné que « l'atteinte des objectifs nationaux en matière de développement des énergies renouvelables supposera quoi qu'il en soit une hausse massive des prélèvements de bois forestiers » (projet SNBC 2, 2019) et « une multiplication par cinq du recours aux usages non-alimentaires de la biomasse à l'horizon 2050 » (MTES, 2019). Toutefois, dans le projet SNBC de 2019 il est proposé de poursuivre l'augmentation des prélèvements prévus entre 2016 et 2026, pour atteindre 81 Mm^3/an en 2035 et 93 Mm^3/an en 2050. A l'horizon 2050, la récolte totale pourrait donc être de l'ordre de 93 Mm^3/an, niveau proche de notre scénario R95.

La part entre les usages matériaux (sciage ou de panneaux) et énergétiques n'est précisée ni dans la stratégie nationale bas carbone ni dans le plan national intégré énergie climat. En revanche le National Forestry Accounting Plan (CITEPA et al., 2018) donne 34% pour les usages solides et 66% pour les usages énergétiques, soit un rapport de BIBE proche de 2. Il s'agirait donc d'une forte augmentation de la part destinée aux usages énergétique, qui pourrait être interprétée soit comme le signe d'une forte baisse de la disponibilité en bois d'œuvre sous l'influence d'évolutions sanitaires et/ou de pratiques sylvicoles, soit par le détournement d'une part importante de bois d'œuvre vers des usages énergétiques, soit les deux vecteurs combinés.

Les mesures sylvicoles à mettre en place pour obtenir cette croissance des prélèvements ne sont pas précisées, mais au vu de notre étude on peut déduire que dans cette vision de l'avenir :

- les stocks en forêt et le puits total diminueront fortement ;
- le volume bois fort tige en 2050 sera loin du capital d'équilibre permettant une sylviculture à couvert continu, qui pourrait pourtant optimiser la production à long terme et la multifonctionnalité des forêts (AFI, 2010) ;
- les trois-quarts au moins du volume des branches et du bois mort seraient récoltés, avec de probables effets dépressifs sur la fertilité des sols et la biodiversité (cfr chapitre 2) ;
- le ratio BIBE / BO passerait de 1,65 à 1,94, ce qui suggère un usage croissant du BO potentiel en BIBE, à moins d'instaurer une sylviculture dédiée au BIBE sur une part de la surface actuelle des forêts françaises.
- enfin, il serait probablement appliqué un abaissement continu de l'âge d'exploitabilité des arbres comme souvent évoqué dans ces rapports, ce qui n'améliorera pas le puits de carbone total et aurait des conséquences fortes sur la biodiversité et la fertilité des sols.

Ces stratégies actuelles d'augmentation des prélèvements, loin d'améliorer le stockage de carbone dans les forêts françaises, devraient plutôt réduire le puits tout en générant des risques pour la fertilité des sols et la biodiversité, ainsi que probablement des conflits d'usages qui n'amélioreraient pas l'image de l'exploitation forestière dans le regard de la société civile.

6. CONCLUSION DE L'ETUDE

Par cette étude, nous avons tenté de faire état des connaissances sur le puits de carbone que constitue la forêt et la filière-bois, pour proposer une stratégie visant à optimiser le rôle de la gestion forestière dans l'atténuation du changement climatique à l'horizon 2050.

Pour décliner concrètement cette stratégie et en étudier les effets potentiels, nous avons d'abord identifié trois situations de gestion type en France métropolitaine (libre évolution, impasses, sylviculture continue). Les surfaces où une sylviculture à couvert continu ne peut être appliquée à court terme (impasses) ont fait l'objet d'un plan de reboisement définissant les essences utilisées et leurs proportions. Ensuite trois scénarios de prélèvement sont définis à partir d'objectifs très différents (priorité filière, priorité écosystème, compromis), en surface constante (16 Mha) et dans deux scénarios d'évolution de la mortalité annuelle, que l'on peut relier à des perspectives climatiques optimistes (RCP 2.6) et pessimistes (RCP 8.5). L'étude veille à la cohérence interne de chaque scénario, limite les variations des paramètres fondamentaux non étudiés (itinéraires par situation de gestion, valorisation des bois) et évite les jugements sur le comportement et les qualités des gestionnaires forestiers mettant en place les scénarios, ce qui peut être une originalité au regard d'autres études fouillées et aujourd'hui influentes (Roux et al., 2017). En revanche, la méthodologie choisie montre aussi des limites, que nous détaillons au fil du texte.

Les scénarios étudiés mènent à des récoltes annuelles totales en 2050 allant de 30 à 95 Mm^3, résultant d'évolutions contrastées du taux de prélèvement bois fort tige, mais aussi des taux de prélèvement des branches et des arbres morts naturellement.

La situation de libre évolution montre le meilleur potentiel d'atténuation entre 2020 et 2050, y compris en considérant les stocks de produits. Le scénario « extensif » optimise l'évolution des stocks dans l'écosystème, tandis que le scénario « intensif » optimise l'évolution des stocks dans les produits-bois ; toutefois à partir d'un état initial égal (2020), le stock total (écosystème + produits) en 2050 est d'autant plus fort que le prélèvement est bas. Le puits (flux annuel) diminue continuellement dans le scénario d'augmentation des prélèvements, tandis qu'il remonte avec le scénario de faibles prélèvements. En 2050, le puits total moyen par hectare du scénario intensif est presque la moitié du puits moyen des surfaces en libre évolution. Intégrer les effets de substitution ne rend pas le scénario intensif plus intéressant pour le climat.

Au vu des connaissances actuelles, ces variations de stock auront très probablement des conséquences sur la biodiversité, mais aussi sur fertilité des sols et donc la capacité des écosystèmes à continuer de produire du bois sans devenir dépendants d'intrants coûteux en énergies et probablement polluants. A long terme, maintenir un prélèvement de 95 Mm^3/an entrainerait une baisse progressive des volumes sur pied, ce qui réduirait significativement le puits de carbone, augmenterait la vulnérabilité des peuplements face aux aléas climatiques et affecterait les capacités de régénération naturelle des forêts. Il est probable qu'ainsi il entraine une hausse de la part de forêts en impasse, donc favorise la forêt de plantation et la futaie régulière.

Au-delà des questions de durabilité écologique, augmenter rapidement les prélèvements comme dans notre scénario R95 imposerait des mesures autoritaires de mobilisation des surfaces gérées et des volumes sur pied. Inversement, baisser les prélèvements comme dans le scénario Ecos pourrait créer une crise d'approvisionnement dans la filière-bois, accentuant les fermetures de scieries, les problèmes d'emploi en zone rurale et entrainant la hausse des imports. Le scénario de maintien des prélèvements actuels parait un compromis intéressant, pour autant qu'ils soient progressivement mieux répartis qu'aujourd'hui.

Ainsi, nous proposons d'approfondir une stratégie d'atténuation fondée sur (1) le choix explicite de maintenir 25% de la surface forestière en libre évolution dont 10% sous statut légal strict ; (2) le maintien jusque 2050 d'un prélèvement de 60 Mm^3/an avec augmentation des surfaces gérées jusque 75% pour mieux répartir ce prélèvement total dans l'espace, atteindre un capital d'équilibre et diminuer le taux de prélèvement des branches et du bois mort.

Il ne faut pas oublier que ces scénarios sont établis à l'échelle nationale, tandis que dans un cadre stratégique et légal défini, la gestion forestière se planifie plutôt à l'échelle régionale et les décisions techniques se prennent à l'échelle locale. L'évolution de nos forêts sera ainsi le résultat de l'addition de micro-décisions portées par les propriétaires et leurs partenaires techniques, sous le regard de la société civile. Cette dernière est susceptible de demander la révision des politiques publiques à une échelle locale comme nationale, mais aussi d'appuyer et de soutenir les propriétaires et leurs partenaires dans leur évolution vers des pratiques vertueuses. Au-delà de la responsabilité portée par l'Etat sur la définition de politiques nationales, chacun participera donc à l'orientation concrète de la gestion. Cette co-responsabilité de tous rejoint celle qui a mené nos forêts dans leur état actuel, mais aussi celle qui mène le climat vers des évolutions préoccupantes, que la forêt ne pourra contenir à elle seule.

Le sujet traité est très complexe et notre étude est loin de le traiter de manière exhaustive et définitive. Elle n'a pas vocation à répondre aux interrogations fortes que pose aujourd'hui l'évolution climatique, le rôle à jouer par la forêt et les produits bois, les conflits croissants entre fonctions des forêts dans l'espace métropolitain. Son rôle essentiel est de démystifier, en partie du moins, les connaissances et calculs nécessaires pour comprendre et simuler l'évolution des stocks et des puits de carbone sous différents scénarios de gestion. En veillant à être rigoureux et transparents, nous avons construit un outil de réflexion et de dialogue évolutif, ouvert et sans tabous, qui nous l'espérons, aidera à concevoir ensemble une gestion réellement multifonctionnelle de la forêt française entre 2020 et 2050.

7. BIBLIOGRAPHIE

Achat D.L., Deleuze C., Landmann G., Pousse N., Ranger J. & Augusto L., 2015b : *Quantifying consequences of removing harvesting residues on forest soils and tree growth – A meta-analysis*. Forest Ecology and Management 348, 124-141.

Achat D.L., Fortin M., Landmann G., Ringeval B. & Augusto L., 2015a : *Forest soil carbon is threatened by intensive biomass harvesting*. Scientific Reports 5 (Nature) : https://www.nature.com/articles/srep15991

Ademe, AgroParisTech & CNPF, 2018 : *GESFOR, Bilan environnemental des systèmes forestiers vis-à-vis du changement climatique et des autres enjeux : pour une optimisation des pratiques sylvicoles et des politiques territoriales*. Editions ADEME 2018.

Ademe, 2019 : *La lettre Recherche n°28*, octobre 2019.

AFI, 2009 : *Le traitement des futaies irrégulières, valoriser les fonctions multiples de la forêt*. Convention France Bois Forêt / Association Futaie Irrégulière. Les résultats technico-économiques du réseau AFI sont régulièrement mis à jour et des brochures détaillées sont disponibles en 2019.

Agostini A., Giuntoli, J. & Boulamanti, A., 2013 : *Carbon accounting of forest bioenergy*. JRC scientific and policy reports, EU 2014.

Allemand N., 2003 : *Estimation des émissions de polluants liées à la combustion du bois en France*. Rapport final CITEPA-CTBA-ADEME.

Angerand S., Aventin C., Besse P., Chatelet A., Floissac L., Pillot P., Valkhoff H., Couturier C., Marcom A., Déquivre T. & Canzian T., 2014 : *Disponibilités en terres arables métropolitaines pour une production soutenable de matériaux biosourcés pour la construction / réhabilitation de bâtiments compatibles avec les objectifs « Grenelle »*. Rapport final du projet Terracrea, Laboratoire de recherche en architecture de Toulouse & association Les Amis de la Terre France.

Augusto L., de Schrijver A., Vesterdal L., Smolander A., Prescott C. & Ranger J., 2015 : *Influences of evergreen gymnosperm tree species on the functioning of temperate and boreal forests*. Biological Reviews 90, 444-466.

Augusto L., Saint-André L., Bureau F., Derrien D., Pousse N. et Cécillon L., 2019 : *Séquestration de carbone organique dans les sols forestiers : impacts de la gestion sylvicole*. Forêt-Entreprise 245, 62-66.

Berry S.L. & Mackey B., 2008 : *Green Carbon, the role of natural forests in carbon storage*. Fenner School of Environment & Society, Australian National University. https://press.anu.edu.au/node/231/download.

Booth M.S., 2018 : *Not carbon neutral: Assessing the net emissions impact of residues burned for bioenergy*. Environnemental Research Letters 13 (2018) 035001.

Bouget C., Lassauce A. & Jonsell M., 2012 : *Effects of fuelwood harvesting on biodiversity – a review focused on the situation in Europe*. Canadian Journal of Forest Research 42.

Böttcher H., Hennenberg K. & Winger C., 2018 : *Forest Vision Germany*. Oko-Institut, 77p.

Bruciamacchie M. & de Turckheim B., 2005 : *La futaie irrégulière, théorie et pratique de la sylviculture irrégulière, continue et proche de la nature*. Edisud.

Carvalhais N., Forkel M., Khomik M., Bellarby J., Jung M., Migliavacca M., Mu M., Saatchi S., Santoro M., Thurner M., Weber U., Ahrens B., Beer C., Cescatti A., Randerson J.T. & Reichtein M., 2014. *Global covariation of carbon turnover times with climate in terrestrial ecosystems*. Nature 514, 213-217.

Cateau E., Duchamp L. Garrigue J., Gleizes L., Tournier H. et Debaive N., 2017 : *Le patrimoine forestier des réserves naturelles - Focus sur les forêts à caractère naturel*. Rapport RNF, 99 pages.

CBD, 2014 : *Connecting biodiversity and climate change mitigation and adaptation*. Report of the second Ad Hoc Technical Expert Group on Biodiversity and Climate Change. http://www.deslibris.ca/ID/242849

CBD, 2016 : *Decision XIII/5 - Ecosystem restoration, short-term action plan*.

CGAAER, 2008 : *La forêt française en 2050-2100, essai de prospective*. Rapport CGAAER n°1723.

CGDD, 2015 : *Le point sur l'occupation des sols en France.* Commissariat Général au Développement Durable, décembre 2015.

CGDD, 2019 : *Chiffres-clés des énergies renouvelables*, *édition 2019.* Commissariat Général au Développement Durable.

Chalayer M., 2015 : *Le sciage des gros bois résineux, héritage du passé ou technique d'avenir ?* Bois-Mag 150, 42-46.

Chalayer, M., 2019 : *Les évolutions de la scierie française*. L'Harmattan, Paris.

Choat B. et al., (auteurs multiples), 2012 : *Global convergence in the vulnerability of forests to drought*. Nature 491: 752-755.

CITEPA, 2017 : *Rapport national d'inventaire au titre de la CCNUCC*.

CITEPA, IGN, MTES & MAAF, 2018 : *National Forestry Accounting Plan*.

CNPF, 2017 : *Faire un diagnostic carbone des forêts et des produits bois à l'échelle d'un territoire – étude de faisabilité Climafor*. ADEME-CNPF.

Colin A. & Thivolle-Cazat A., 2016 : *Disponibilités forestières pour l'énergie et les matériaux à l'horizon 2035*. IGN, ADEME et FCBA, 2016.

Colin F., Brunet Y., Vinkler I., Dhôte J.F, 2008 : *Résistance aux vents forts des peuplements forestiers, et notamment des mélanges d'espèces.* Revue Forestière Française 55(2), 191-205.

Collectif, 2018 : *Letter from scientists to the EU Parliement regarding forest biomass*. Signée par 659 scientifiques en janvier 2018. Appuyée par « *Scientific basis of EU climate policy on forests* », signée par 190 scientifiques pour les décideurs de l'UE le 25/09/2017.

Cosola G., Grigolato S., Ackerman P., Monterotti S. & Cavalli R., 2017 : *Carbon Footprint of Forest Operations under Different Management Regimes*. Croat. j. for. eng. 37(1), 201-2017.

Couturier C., 2018 : *Bilan-Carbone des bioénergies, agriculture et forêt*. Solagro-Negawatt, 2018.

De l'Estoile, M., 2012 : *La valorisation de la forêt française*. EFESE, Journal Officiel de la République Française, octobre 2012.

Deheza, M. & Bellassen, V., 2010 : *Valorisation carbone de la filière forêt-bois en France.* CDC Climat, étude climat 20, avril 2010.

Del Rio et al., (auteurs multiples), 2016 : *Species interactions increase the temporal stability of community productivity in Pinus sylvestris–Fagus sylvatica mixtures across Europe.* Journal of Ecology https://doi.org/10.1111/1365-2745.12727.

Derrien D., 2018 : *Le carbone organique des sols forestiers, un stock en constante évolution*. Forêt-Entreprise 242, 44-48.

Diamond J.M. 1975 : *The Island Dilemma, Lessons of Modern Biogeographic Studies for the Design of Natural Reserves.* Biological Conservation 7-2, 129-146.

Diaz-Yanez O., Mola-Yudego B. & Gonzales-Ollabarria J.R., 2017 : *How does forest composition and structure affect the stability against wind and snow ?* Forest Ecology and Management 401, 215-222.

Didolot F. & Thomas J., 2015 : *Enquête Resofop 2015*, CNPF, 43 pages.

Dooley K., Sharma S., Anderson T., Gurian-Sherman D. & Riggs P., 2018 : *Missing Pathways to 1.5°C, The role of the land sector in ambitious climate action.* Climate Land Ambition and Rights Alliance.

DSF, 2018 : *Quelques indicateurs de la santé des forêts 1998-2017*. Direction de la Santé des Forêts, Ministère de l'Agriculture, 2018.

Duchiron M.S., 1994 : *Gestion des futaies irrégulières et mélangées*. Editions de l'auteur, Paris, 172 p.

Dupouey J.-L., Pignard G., Badeau V., Thimonier A., Dhôte J.F, Nepveu G., Bergès L., Augusto L., Belkacem S. & Nys C., 2000 : *Stocks et flux de carbone dans les forêts françaises*. Revue Forestière Française LII - numéro spécial, 139-154.

Dvorak L., Bachmann P. & Mandallaz D., 2011 : *Sturmschäden in ungleichförmigen Beständen.* Journal Forestier Suisse 152-11, pp 445-452

E. Dufrene, H. Davi, C. François, G. Le Maire, V. Le Dantec, et al., 2005 : *Modelling carbon and watercycles in a beech forest Part I: model description and uncertainty analysis on modelled NEE*. Ecological Modelling 185, 407-436. 10.1016/j.ecolmodel.2005.01.004.ird-00392159

EASAC, 2017 : *Multi-functionality and sustainability in the European Union's forests.* European Academies Science Advisory Council policy report 32, april 2017.

ECOFOR, 2016 : *Gestion durable et biodiversité des sols forestiers*. GIP-Ecofor, Ministère de l'Agriculture.

EFESE, 2019 : *La séquestration de carbone par les écosystèmes en France*. Rapport d'évaluation, Evaluation Française des Ecosystèmes et Services Ecosystémiques, mars 2019.

EU, 2003 : *Official Journal of the EU 25/10/2003 Annex IV* : « the emission factor for biomass shall be zero ».

EU, 2019 : *International Reference Life Cycle Data System Handbook*. Institute for Environment and Sustainability, Join Reseach Center, First Edition.

FAO, 2010 : *Global Forest Ressources Assesment*, Forestry Papers 163.

FAO, 2014 : *Agriculture, forestry and other land use emissions by sources and removals sinks : 1990-2011 analysis*. FAO statistics Division Working Paper.

FCBA, 2018 : *Memento 2018*.

Federici S., Tubiello F.N., Salvatore M., Jacobs H. & Schmidhuber J., 2015 : *New estimates of CO_2 forest emissions and removals: 1990-2015*. Forest Ecology and Management 352 : 89-98.

Galik C.S. & Jackson R.B., 2009 : *Risks to forest carbon offset projects in a changing climate*. Forest Ecology and Management 257, 2209–2216.

GIEC, 2018 : *Global warming of 1,5°C*, special report, 2018.

Gleizes O. & Martel S., 2019 : *Climafor, le nouvel outil de quantification du carbone du CNPF.* Forêt Entreprise 245, 75-76.

Goudet M. & Nageleisen L.M, 2019 : *Protocole Dépéris, méthode de notation simplifiée de l'aspect du houppier des arbres forestiers dans un contexte de dépérissement.* Forêt-Entreprise 246, 37-40.

Grace J., Mitchard E. & Gloor E., 2014 : *Perturbations in the carbon budget of the tropics.* Global Change Biology. 20 (10), 3238–3255.

Griess V., Acevedo-Cabra R., Härtl F. & Staupeldahl K., 2012 : *Does mixing tree species enhance stand resistance against natural hazards ? A case study for spruce.* Forest Ecology and Management 267, 284-296.

Haberl et al., (auteurs multiples), 2012 : *Correcting a fundamental error in greenhouse gas accounting related to bioenergy*. Energy Policy 45.

Haberl H., Erb K.H. & Krausmann F., 2014 : *Human Appropriation of Net Primary Production - Patterns, Trends, and Planetary Boundaries.* Annual Review of Environment and Resources 39, 363-391.

Haberl, H., 1997 : *Human Appropriation of Net Primary Production as an Environmental Indicator : Implications for Sustainable Development.* Ambio, 26(3), 143–146.

Haberl, H., Erb, K. H., Krausmann, F., Gaube, V., Bondeau, A., Plutzar, C. & Fischer-Kowalski, M., 2007 : *Quantifying and mapping the human appropriation of net primary production in earth's terrestrial ecosystems.* Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 104(31), 12942–12947. https://doi.org/10.1073/pnas.0704243104.

Hagemann U., Moroni M.T., Gleißner J. F., 2010 : *Disturbance history influences downed woody debris and soil respiration.* Forest Ecology and Management 260(10), 1762-1772.

Hennenberg K.J., Böttcher H. & Bradshaw C.J.A., 2018 : *Revised European Union renewable-energy policies erode nature protection.* Nature Ecology & Evolution, 2 (10), 1519-1520.

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 ?* Carrefour de la recherche agronomique « Une bioéconomie basée sur le bois », Nancy (France), 8 déc. 2016, 28 diapos.

IFN, 2010 : *La forêt française, résultats issus des inventaires 2005-2009*.

IFN, 2011 : *Prélèvements de bois en forêt et production biologique : des estimations directes et compatibles*. IF n°28.

IFN, 2012a : *Quelles sont les ressources exploitables ? Analyse spatiale et temporelle*. L'IF 30, IFN 2012.

IFN, 2012b : *Le bois mort en forêt*. IF n°29.

IFN, 2014 : *Forêt et changements climatiques : apports des données d'Inventaire*. IF 33.

IFN, 2018 : *Méthodologie, pour bien comprendre les résultats publiés*. Disponible en ligne.

IFN, 2019a : Extractions directes de résultats synthétiques en mode expert sur *https://inventaire-forestier.ign.fr*.

IFN, 2019b : *Bilan 2018 des flux en forêt*. IFN, 2019.

IGN, 2015 : *Indicateurs de gestion durable 2015*.

IGN, 2018b : *La forêt française, état des lieux et évolutions récentes*. IFN-IGN.

Jactel H. et al., (auteurs multiples), 2009 : *The influences of forest stand management on biotic and abiotic risks of damage*. Annals of Forest Science 66(7) : 701 - https://doi.org/10.1051/forest/2009054.

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.

Jactel H., Bauhus J., Boberg J., Bonal D., Castagneyrol B., Gardiner B., Gonzalez-Olabarria, J.R., Koricheva J., Meurisse N. & Brockerhoff E.G., 2012 : *Tree diversity drives forest stand resistance to natural disturbances*. Current Forestry Reports 3(3), 223-243.

Jactel H., Gritti E.S., Drössler L., Forrester D.I., Mason W.L., Morin X., Pretzsch H. & Castagneyrol B., 2018 : *Positive biodiversity–productivity relationships in forests: climate matters*. Biology Letters. 14 : 20170747.

James J. & Harisson R., 2016 : *The effects of harvest on soil carbon, a meta-analysis*. Forests 7, 1-22.

Jonard M., Nicolas M., Dommes D., Caignet I., Saenger A. & Ponette Q., 2019 : *Les sols du réseau Renecofor sequestrent le carbone*. Forêt Entreprise 245, 67-71.

Jourdan, M, Lebourgeois F, Morin X. in press. *The effect of tree diversity on the resistance and recovery of forest stands in the French Alps may depend on species differences in hydraulic features*. Forest Ecology and Management.

JRC, 2010 : *General guide for life cycle assessment*. International Life Cycle Data Reference System Handbook, European Union, 2010.

JRC, 2013

Keith H., Lindenmayer D., Macintosh A. & Mackey B., 2015 : *Under What Circumstances Do Wood Products from Native Forests Benefit Climate Change Mitigation ?* PLOS ONE - DOI:10.1371/journal.pone.0139640, 23p.

Keith, H., Lindenmayer D., Macintosh A. & Mackey B., 2015 : *Under what circumstances do wood products from native forests benefit climate change mitigation ?* Paul Adam (ed.), PLOS ONE 10 (10), e0139640.

Knoke T., Ammer C., Bernd S. & Reinhard M.M., 2008 : *Admixing broadleaves to coniferous tree species : a review on yield, ecological stability and economics*. European Journal of Forest Resarch 127, 89-101.

Law B.E, Hudiburg T.W., Berner L.T., Kent J.J., Buotte P.C. & Harmon M.E., 2018 : *Land use strategies to mitigate climate change in carbon dense temperate forests.* Proceedings of the National Academy of Sciences. 115 (14), 3663–3668.

Leturcq Ph., 2011 : *La neutralité carbone, un concept trompeur*. Revue Forestière Française 53.

Leturcq Ph., 2014 : *Wood preservation (carbon sequestration) or wood burning (fossil-fuel substitution), which is better for mitigating climate change ?* Annals of Forest Science 71, 117-124.

Leturcq, 2018 : *Forêt, bois, CO2 - le bois-énergie mis en question*. Editions de l'auteur, 59 pages.

Lewis S.L. & Wheeler C.E., 2019 : *Regenerate natural forests to store carbon*. Nature Comments 568, 25-28.

Lippke B., 2009 : *Maximizing Forest Contributions to Carbon Mitigation. The science of life cycle analysis, a summary of CORRIM's research findings.* CORRIM Fact Sheet n°5.

Lousteau D. et al., 2010 : *Carbofor, Séquestration de Carbone dans les grands écosystèmes forestiers en France, Quantification, spatialisation, vulnérabilité et impacts de différents scénarios climatiques et sylvicoles*. Rapport final, INRA 2010.

Luyssaert S. et al., (auteurs multiples), 2018 : *Trade-offs in using European forests to meet climate objectives*. Nature 562, 259-262.

Luyssaert S., Schülze E.D., Börner A., Knohl A., Hessenmöller D., Law B.E., Ciais P . & Grace J., 2008 : *Old-growth forests as global carbon sinks*. Nature 455, 213-215.

MAAF, 2018 : Plan national de la Forêt et du Bois

Mackey, B., DellaSala D.A., Kormos C., Lindenmayer D., Kumpel N., Zimmerman B., Hugh S., Young V., Foley S., Arsenis K. & Watson J.E.M, 2015 : *Policy Options for the World's Primary Forests in Multilateral Environmental Agreements - Policy options for world's primary forests*. Conservation Letters. 8 (2), 139–147. http://doi.wiley.com/10.1111/conl.12120

Madignier M.-L., Benoit G. & Roy C., 2014. *Les contributions possibles de l'agriculture et de la forêt à la lutte contre le changement climatique.* Rapport CGAAER, Paris.

Maresca B. & Picard D., 2010 : *Les propriétaires forestiers sont attachés à leur patrimoine mais peu motivés par son exploitation commerciale*. CREDOC, Consommation et modes de vie 228, 4 pages.

Martel S., Loustau D., Achat D., Picard O., Moisy C., Drouineau S., Maviel M., Mugica A., Petroff A., Husson H., Maris C. & Beaussart X., 2018 : *Evaluation de l'effet d'atténuation des forêts de production adaptées au changement climatique : projet EVAFORA*, rapport final, 53 p.

Martel S., 2019a : *Quel rôle pour les forêts et la filière-bois françaises dans l'atténuation du changement climatique ?* Forêt-Entreprise 245, 43-50.

Martel S., 2019b : *Gestion, âge, CO2 – que nous apprennent de récentes publications ?* Forêt Entreprise 245, 59-61.

Martel S., Achat D., Moisy C., Rupil L. & Loustau D., 2019 : *Quel bilan carbone des pinèdes et des douglasaies sous climat changeant ?* Forêt-Entreprise 245, 30-37.

Mélières M.A. & Riou-Nivert P., 2019 : *Scolytes, chablis, canicules et changement climatique – un mélange explosif*. Forêt-Entreprise 248, 54-60.

Moomaw W.R., Masino S.A. & Faison E.K ., 2019 : *Intact Forests in the United States - Proforestation Mitigates Climate Change and Serves the Greatest Good*. Frontiers in Forest and Global Change doi: 10.3389/ffgc.2019.00027.

Moore J.C., 2018 : *Predicting tipping points in complex environmental systems.* Proceedings of the National Academy of Sciences 115 (4), 635–636.

Morin X, Fahse L., Jactel H., Scherer-Lorenzen M., García-Valdés R. & Bugmann H., 2018 : *Long-term response of forest productivity to climate change is mostly driven by change in tree species composition*. Scientific Reports. 8 (Nature) - 10.1038/s41598-018-23763-y.

Morin X., Fahse L., De Mazancourt C., Scherer-Lorenzen M. & Bugmann H., 2014 : *Temporal stability in forest productivity increases with tree diversity due to asynchrony in species dynamics*. Ecology Letters, 17, 1526-1535.

MTES, 2015 : *Projet de stratégie nationale bas carbone. La transition écologique et solidaire vers la neutralité carbone*. Ministère de la Transition Ecologique et Sociale, 2015.

MTES, 2018a : *Stratégie Nationale Bas-Carbone*. Ministère de la Transition Ecologique et Sociale, projet version décembre 2018.

MTES, 2018b *: Plan National d'Adaptation au Changement Climatique*. Ministère de la Transition Ecologique et Sociale.

Nabuurs, G.J, Lindner M., Verkerk P.J., Gunia K., Deda P., Michalak R. & Grassi G., 2013 : *First signs of carbon sink saturation in European forest biomass*. Nature Climate Change 3, 792-796.

Nageleisen L.M., de Saintonge F.X. & Riou-Nivert P., 2010 : *La santé des forêts*. CNPF-IDF, 2010, 608 p.

Naudts K., Chen Y., McGrath M.J., Ryder J., Valade A., Otto J. & Luyssaert S., 2016 : *Europe's forest management did not mitigate climate warming*. Science 351, 597-600.

Odum E.P., 1969 : *The strategy of ecosystem development*. Science 164 (3877), 262-270.

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.

Pelletier C, 2018 : *Analyse environnementale et économique des filières bois-énergie*. Thèse de doctorat 2017, Université de Lorraine départements Milieux et Changements globaux, HAL Archives Ouvertes.

Peyron J.L., 2015 : *Travaux exploratoires*, in *« Climat, Forêt, Société – Livre vert »*, Caulet Y., 2015.

Pingoud K., Pohjola J. & Valsta L., 2010 : *Assessing the Integrated Climatic Impacts of Forestry and Wood Products*. Silva Fennica 44(1) : https://www.silvafennica.fi/pdf/article166.pdf · ISSN 0037-5330.

Ponette Q. & Ranger J., 2000 : *Biomasse et minéralomasse aérienne de cinq peuplements de douglas du réseau Renécofor : quantifications et implications sylvicoles*. Revue Forestière Française 52, 115-134.

Pregitzer K. S. & Euskirchen, E. S., 2004 : *Carbon Cycling and Storage in Worlds Forests ; Biome Patterns Related to Forest Age.* Global Biology Change, 10, 2052-2077.

Prisley S.P., Gaudreault C., Lamers P., Stewart W., Miner R., Junginger H.M., Oneil E., Malmsheimer R., Volk T.A., 2018. *Comment on 'Does replacing coal with wood lower CO2 emissions? Dynamic lifecycle analysis of wood bioenergy'.* Environmental Research Letters, 13 (12), 128002.

Pro Silva Europe, 2012 : *Pro Silva Principles*, Pro Silva Europe, 69 pages - disponible sur www.prosilva.fr.

Pro Silva France, 2012a : *Position de Pro Silva France à propos du bois-énergie*. Rédaction collective.

Pro Silva France, 2012b : *Importance et rôles des gros et très gros bois en France, Synthèses croisées et recommandations pour une gestion durable.* Rapport d'étude réalisé avec le soutien financier du Ministère de l'Ecologie du Développement Durable et de l'Energie, Juillet 2012, 142 pages.

Pro Silva France, 2013 : *Application de la SICPN aux différentes essences*. Brochure disponible sur www.prosilva.fr.

Pro Silva France, 2014 : *Gérer la forêt pour produire du bois de qualité en accompagnant les dynamiques naturelles*, disponible sur www.prosilva.org

Reichstein et al. (auteurs multiples), 2013 : *Climate extremes and the carbon cycle*. Nature 500, 287-295.

Resofop, 2016 : *Enquêtes des propriétaires privés menés par Forestiers Privés de France* (https://www.foretpriveefrancaise.com/n/resofop-l-observatoire-des-forestiers-prives/n:35).

Robinet C. & Roques A., 2010 : *Direct impacts of recent climate warming on insect populations*. Integrative Zoology 2010, 132-142.

Rossi M., André J. & Vallauri D., 2015 : *Le carbone forestier en mouvements, Éléments de réflexion pour une politique maximisant les atouts du bois*. Refora 2015.

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).

Ruffault J., Moron V., Trigo R. & Curt T ., 2016 : *Objective identification of multiple large fire climatologies : an application to a mediterranean ecosystem.* Environmental Researche Letter 11(7), pp.075006 - 10.1088/1748-9326/11/7/075006.

Rupil L., Castro A. & Samalens J.C., 2019 : *Quels outils pour estimer les stocks de carbone du pin maritime dans les Landes ?* Forêt-Entreprise 245, 38-42.

Rüter S., Werner F., Forsell N., Prins C., Vial E. & Levet A.-L., 2016 : *Climate benefits of material substitution by forest biomass and harvested wood products: Perspective 2030*. ClimWood2030. Final Report, Thünen Report 42, Braunschweig, Germany. http://dx.doi.org/doi:10.3220/REP1468328990000.

Sathre R. & O'Connor J., 2010 : *Meta-analysis of Greenhouse Gas Displacement Factors of Wood Product Substitution*. Environmental Science & Policy 13, 104-114.

Schlesinger W. H., 2018 : *Are wood pellets a green fuel ?* Science 359 (6382), 1328–1329.

Searchinger T.D., Beringer T., Holtsmark B., Kammen D.M., Lambin E.F., Lucht W., Raven P. & Van Ypersele J.P., 2018 : *Europe's renewable energy directive poised to harm global forests*. Nature Communications 9.

Seguin B., 2010 : *Le changement climatique, conséquences pour l'agriculture et les forêts*. In Rayonnement du CNRS n°54.

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.

Smyth C.E., Stinson G., Neilson E., Lemprière T.C., Hafer M., Rampley G.J. & Kurz W.A., 2014 : *Quantifying the biophysical climate change mitigation potential of Canada's forest sector*. Biogeosciences, 11, 3515– 3529.

Snupfen-Solidaires, 2009 : *Le bois énergie - Enjeux, perspectives et risques*.

Solagro, 2016 : Afterre 2050, version 2016.

Sousa-Silva R., Verheyen K., Ponette Q., Bay E., Sioen G. Titeux G. Ven de Peer T., Van Meerbeek K. & Muys B., 2018 : *Tree diversity mitigates defoliation after a drought-induced tipping points*. Global Change Biology, mai 2018.

Stephenson N.L. et al., (auteurs multiples), 2014 : *Rate of tree carbon accumulation in increases continuously with tree size*. Nature 507, 90-93.

Sterman J.D., Siegel L. & Rooney-Varga J.N., 2018 : *Does replacing coal with wood lower CO2 emissions? Dynamic lifecycle analysis of wood bioenergy*. Environmental Research Letters. 13 (1), 015007.

Sterman J.D., Siegel L., Rooney-Varga J.N., 2018. *Reply to comment on 'Does replacing coal with wood lower CO2 emissions? Dynamic lifecycle analysis of wood bioenergy'.* Environmental Research Letters, 13 (12), 128003.

Susse R., Allegrini C., Brucchiamachie M. & Burrus R., 2009 : *Valoriser les fonctions multiples de la forêt - le traitement des futaies irrégulières*. Convention France Bois Forêt / Association Futaie Irrégulière, 144p.

Thompson I., Mackey B., McNulty S. & Mosseler A., 2009 : *Forest Resilience, Biodiversity, and Climate Change - A synthesis of the biodiversity/resilience/stability relationship in forest ecosystems*. Secretariat of the Convention on Biological Diversity, Montreal, technical Series 43, 67 pages.

UICN, 2018 : *Les solutions fondées sur la nature pour lutter contre les changements climatiques et réduire les risques naturels en France.*

Valade A., Bellassen B., Luyssaert S., Vallet P., Djomo S.N., 2017 : *Bilan carbone de la ressource forestiere francaise - Projections du puits de carbone de la filière forêt-bois française et incertitude sur ses déterminants.* Rapport de recherche, 66p. HAL Archives Ouvertes Id : hal-01629845, https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01629845.

Valade A., Luyssaert S., Vallet P., Djomo S.N., Van Der Kellen I. & Bellassen V., 2018 : *Carbon costs and benefits of France's biomass energy production targets*. Carbon Balance and Management 13:26.

Valinger E. & Fridman J., 2011 : *Factors affecting the probability of windthrow at stand level as a result of Gudrun winter storm in southern Sweden*. Forest Ecology and Management 262, 398-403.

Vallauri et al., 2010 : *Biodiversité, naturalité, humanité - pour inspirer la gestion des forêts*. Editions Lavoisier, Paris, 474 p.

Van der Plas et al., (auteurs multiples) F., 2017 : *Continental mapping of forest ecosystem functions reveals a high but unrealised potential for forest multifunctionality*. Ecology Letters https://doi.org/10.1111/ele.12868.

Vanderhoof M., Williams C., Pasay M. & Ghimire P.B., 2012 : *Controls on the rate of CO2 emission from woody debris in clearcut and coniferous forest environments.* Biogeochemistry 114: 299. https://doi.org/10.1007/s10533-012-9810-4

Veulien L., 2016 : *Reconnaître les particularités des forêts méditerranéennes françaises.* AgroParisTech-MAAF.

Vial E., 2019 : *L'effet de substitution – des économies d'émissions de CO2 en remplacant les matériaux et énergies dominants par le bois*. Forêt Entreprise 245, 73-74.

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 and Policy 13(1), 72-85.

Wilcox B.A. & Murphy D.D., 1985 : *Conservation strategy: The effects of fragmentation on extinction*. American Naturalist 125, 879-887.

Wilson E.O. 2016 : *Half Earth, Our Planet's Fight for Life*. Liverwright Publishing Corporation, New York.

WMO, 2019 : *The global climate change in 2015-2019*. World Meteorologic Organisation, http://public.wmo.int.

WWF, 2016 : *Cascading use of wood products*. Technical Report Mondi.

Zanchi G., Pena N. & Bird N., 2012 *: Is wood bioenergy carbon neutral ? A comparative assessment of emissions from consumption of woody bioenergy and fossil fuel*. Bioenergy 4, 761-772.

Zeide B., 1993 : *Analysis of Growth equations*. Forest Science 39, 594-616.

Zhou G.Y., Liu S.G., Li Z.A., Zhang D.Q., Tang X.L., Zhou C.Y., Yan J.H. & Mo J.M., 2006 : *Old-growth forests can accumulate carbon in soils*. Science 314:1417.

Janvier 2020