



Note de Cadrage : Méthode de Maintien des Peuplements Forestiers par Couvert Continu

Présentée par le consortium AFI / Pro Silva France / Société Forestière CDC

1. Contexte et Présentation du Consortium

À la suite de nos récents échanges, nous souhaitons apporter des précisions concernant la méthodologie bas-carbone que nous avons développée pour une gestion forestière à couvert continu, et qui s'inscrit dans le cadre du **Label Bas-Carbone (LBC)**. Ce projet est porté par un consortium réunissant l'Association Futaie Irrégulière (AFI), Pro Silva France et la Société Forestière de la Caisse des Dépôts (SFCDC). Chacune de ces entités joue un rôle déterminant dans l'élaboration de cette approche rigoureuse, fondée sur des décennies d'expérience dans la gestion durable des forêts.

Pro Silva France, fondée en 1990 en Slovénie avec une portée européenne, s'est donnée pour mission de promouvoir une gestion forestière durable basée sur l'observation, l'adaptation et une gestion sylvicole à couvert continu. L'association cherche à concilier performance économique, écologie et acceptation sociale. Pro Silva France a été reconnue d'utilité publique en 2013, ce qui témoigne de son engagement et de son influence croissante. Le réseau de Pro Silva s'étend sur 27 délégations nationales en

Europe, contribuant activement à la formation et à la sensibilisation des acteurs forestiers.

De son côté, l'**Association Futaie Irrégulière (AFI)** a été créée en 1991 à l'initiative d'experts forestiers privés, en partenariat avec l'École Forestière de Nancy. L'AFI est spécialisée dans la gestion en futaie irrégulière et dispose d'une base de données unique en Europe. Cette base, construite à partir de plus de 500 mesures sur 140 dispositifs répartis dans neuf pays européens, est devenue une référence pour l'étude et la gestion des forêts irrégulières. L'AFI joue un rôle crucial dans la recherche appliquée et l'échange d'informations techniques, notamment par le biais de partenariats avec des institutions scientifiques et forestières. Ces deux associations, fortes de plus de 30 ans de collaboration, apportent ainsi une expertise complémentaire : l'AFI assure un suivi scientifique rigoureux, tandis que Pro Silva déploie et promeut ces pratiques à une échelle plus large à travers ses réseaux.

Enfin, la Société Forestière de la Caisse des Dépôts est un opérateur majeur de la gestion d'espaces naturels et forestiers en France. Gestionnaire pour compte de tiers de 300 000 hectares sur le territoire national depuis 1966, elle a développé une compétence reconnue autour de ses 5 métiers que sont la gestion forestière, la transaction, l'investissement, le conseil et la valorisation de solutions fondées sur la forêt. Membre fondateur du Club Carbone Forêt-Bois aux côtés d'autres acteurs tels que l'institut I4CE, elle a fortement contribué au développement des réflexions sur la valorisation du carbone forestier, a pu accompagner techniquement le CNPF dans l'écriture des premières méthodes forestières du LBC, et est aujourd'hui le second opérateur national en matière de valorisation du LBC forestier.

2. Objectifs du Projet Bas-Carbone

Le **Label Bas-Carbone (LBC)**, mis en place par décret en novembre 2018, a pour ambition d'encourager des pratiques de gestion forestière qui contribuent à la réduction des émissions de gaz à effet de serre tout en assurant la durabilité des écosystèmes forestiers. Dans ce contexte, dès 2019, l'AFI et Pro Silva France ont entrepris de réfléchir à l'applicabilité de ce concept à la gestion des futaies irrégulières. Nous avons identifié un besoin urgent d'accompagner la transformation de certains peuplements forestiers, principalement ceux exposés à un risque élevé de déstockage rapide de carbone, tels que les futaies résineuses régulières et les taillis adultes. Cet objectif a rapidement rejoint celui de la Société Forestière qui réfléchissait de son côté à une méthode qui permettrait de valoriser une prolongation de la durée de vie des peuplements réguliers résineux. Les 3 acteurs ont alors décidé de se regrouper, pour ne présenter à la labellisation qu'une seule méthode.

L'objectif principal de cette méthodologie est d'inciter les propriétaires forestiers à opter pour une gestion plus durable de leurs peuplements, en évitant les coupes rases qui, bien que lucratives à court terme, entraînent des émissions massives de carbone et occasionnent d'autres difficultés significatives. En soutenant cette transition vers une

gestion à couvert continu, nous proposons un modèle qui allie résilience écologique, bénéfices économiques à long terme, et préservation des puits de carbone.

3. Méthodologie Proposée et Justifications Techniques

Notre méthodologie repose sur une approche ciblée qui met l'accent sur les peuplements les plus à risque de déstockage carbone. Les **futaies résineuses régulières** et les **taillis adultes** sont particulièrement vulnérables aux pratiques de gestion intensives, notamment les coupes rases, qui libèrent rapidement de grandes quantités de carbone dans l'atmosphère. La transformation de ces peuplements vers une structure irrégulière, avec un maintien du couvert continu, constitue la base de notre approche.

Un aspect central de cette méthode est l'**additionnalité**. Nous estimons que dans les futaies irrégulières déjà bien structurées, mais également dans les taillis-sous-futaies, l'additionnalité carbone est aujourd'hui plus difficile à prouver. Ces peuplements sont souvent gérés depuis des décennies de manière durable, avec une stabilité économique et écologique qui ne justifie pas nécessairement un soutien financier sous forme de crédits carbone. En revanche, les efforts des propriétaires pour améliorer leur rôle dans la préservation des écosystèmes, de la biodiversité, et des services écosystémiques mérite d'être valorisé par d'autres formes de financement, comme les **Paielements pour Services Écosystémiques (PSE)**.

Dans notre analyse, les labels de reconnaissant des « émissions évitées » ou des « réductions d'émissions » doivent être réservés aux peuplements qui, sans intervention, risquent des pratiques de gestion entraînant un déstockage rapide de carbone, comme les coupes rases. En ce sens, notre méthodologie propose une transformation progressive vers une gestion irrégulière pour les peuplements les plus vulnérables face au risque de coupe rase.

4. Réflexions sur les Défis Méthodologiques

Il est essentiel de souligner que l'**additionnalité** est au cœur de la validation de toute méthode bas-carbone. Notre approche cible des peuplements où l'additionnalité carbone est tangible : sans le soutien financier du label, les futaies résineuses régulières et les taillis adultes risqueraient d'être rasés, ce qui entraînerait un déstockage massif et rapide de carbone, ce que nous cherchons à éviter.

À l'inverse, les peuplements irréguliers, déjà stabilisés et équilibrés, ne nécessitent pas de financements additionnels pour éviter de telles pratiques. Appliquer une méthodologie carbone à ces peuplements pourrait engendrer un **effet d'aubaine**, où les réductions d'émissions seraient attribués sans véritable impact supplémentaire sur le climat. Il s'agit d'une problématique bien documentée, notamment à travers les scandales survenus aux **États-Unis**, où des crédits carbone ont été octroyés sans que l'additionnalité soit démontrée. Des études telles que celles publiées par **Carbon Plan**

en 2021 ont révélé que près de 30 % des crédits émis manquaient d'additionnalité réelle, ce qui a discrédité certaines initiatives.

Notre méthodologie vise à éviter de telles dérives en nous concentrant sur les peuplements où une véritable transformation est nécessaire pour maintenir les stocks de carbone, tout en proposant des alternatives crédibles pour les peuplements irréguliers, avec des **Paiements pour Services Écosystémiques** permettant de soutenir les pratiques en faveur de l'écologie

5. Priorisation des Actions et Propositions du Consortium

Pour les raisons évoquées ci-dessus, le consortium AFI / Pro Silva France / Société Forestière de la Caisse des Dépôts a priorisé les actions sur les peuplements présentant un **risque réel de déstockage carbone**, en particulier les **futaies résineuses régulières** et les **taillis adultes**. Ces types de peuplements, couramment trouvés dans des régions comme le **Massif Central**, sont fortement exposés à des pratiques de gestion intensives et notamment des coupes rases. Sans intervention, ces pratiques peuvent conduire à des pertes importantes de carbone.

C'est bien dans ce cadre que notre projet a bénéficié du soutien financier des **régions Occitanie, Auvergne-Rhône-Alpes, et Bourgogne-Franche-Comté**, qui ont rapidement perçu l'importance de cette démarche pour préserver les forêts locales et lutter contre le changement climatique. Grâce à ce soutien, nous avons pu concevoir une méthodologie rigoureuse pour accompagner les propriétaires forestiers dans la transformation de leurs peuplements vers une gestion à couvert continu, réduisant ainsi les risques d'émissions massives de carbone tout en améliorant la résilience des forêts.

Parallèlement, pour les **futaies irrégulières déjà établies**, nous préconisons une autre approche, fondée sur la valorisation des services écosystémiques qu'elles fournissent. Nous considérons que les **Paiements pour Services Écosystémiques (PSE) autres que le Carbone**, en mettant l'accent sur des services comme la biodiversité, la protection des paysages et l'accueil du public, représentent un modèle de financement mieux adapté à ces peuplements. Les PSE permettent de récompenser les gestionnaires forestiers qui préservent ces services, sans recourir aux crédits carbone.

6. Conclusion et Recommandations

En conclusion, notre consortium, après instruction et corrections éventuelles, que la méthodologie de **maintien des peuplements forestiers par couvert continu** soit validée par le **Ministère de la Transition Ecologique**, dans le cadre des limites que nous avons fixées pour garantir une rigueur scientifique et technique. Nous insistons sur l'importance de concentrer les efforts sur les peuplements à risque, tels que les futaies résineuses régulières et les taillis adultes, où les financements au titre du carbone apportent une additionnalité réelle et démontrable.

En ce qui concerne les **futaies irrégulières**, nous estimons que les crédits carbone ne sont pas la solution appropriée, car l'additionnalité carbone ne peut être rigoureusement prouvée dans ces peuplements déjà équilibrés. Cependant, nous soutenons fermement l'idée de **Paielements pour Services Écosystémiques (PSE)** autres que ceux du Carbone pour valoriser les nombreux bénéfices que ces peuplements apportent en matière de biodiversité, de protection des paysages et de résilience face aux aléas climatiques.

Cette approche nous semble être la meilleure manière d'accompagner la transition vers une gestion forestière durable, tout en assurant l'intégrité scientifique et la transparence du **Label Bas-Carbone**.

Signataires :



Julien TOMASINI, *Président*

Eric BOITTIN, *Trésorier*

Max BRUCIAMACCHIE,
Directeur scientifique

Marie-Laure MARTIN BELLIER,
Chargée de mission Carbone



Evrard de TURCKHEIM,
Président

Nicolas LUIGI, *Délégué
Général*

Gaétan du BUS, *Chargé
de mission Carbone*



Ceydric SEILOT-GASMI,
Directeur des Opérations

Kevin BRICE, *Chargé
d'étude*

LABEL BAS CARBONE

METHODE « MAINTIEN DE PEUPLEMENTS FORESTIERS PAR COUVERT CONTINU »

Version 1.3 – Octobre 2024

Avec le soutien financier de :

Table des matières

Table des illustrations	1
1. Préambule.....	1
1.1. Contexte.....	1
1.2. Rédacteurs	2
1.3. Remerciements	2
1.4. Evolution continue	3
2. Applicabilité, définitions, durée	3
2.1. Maintien de peuplements forestiers par couvert continu.....	4
2.1.1. Par irrégularisation des peuplements.....	4
2.1.2. Par allongement des cycles de production.....	5
2.2. Durée de projet	6
2.3. Le Porteur de projet.....	6
2.4. Sélection des sources/puits et compartiments	7
3. Critères d'éligibilité.....	8
3.1. Pièces à fournir	8
3.2. Éligibilité des projets.....	10
3.2.1. Adéquation des peuplements à la station et au changement climatique.....	10
3.2.2. Cas des essences vulnérables.....	10
3.2.3. Critères minimums d'exploitabilité	11
3.2.4. Prise des données sur le terrain	13
4. Choix du scénario de référence et démonstration de l'additionnalité.....	13
4.1. Choix du scénario de référence	13
4.2. Démonstration de l'additionnalité	14
4.2.1. Additionnalité réglementaire	14
4.2.2. Additionnalité économique	14
4.2.3. Additionnalité technique	15
4.3. Analyses de la méthode	15
4.3.1. Analyse légale et des aides publiques existantes.....	15
4.3.2. Analyse économique	16
4.3.3. Analyse du contexte global de développement des sylvicultures à couvert continu	18
4.3.4. Analyse des barrières techniques.....	19
5. Intégrité environnementale.....	20
6. Intégration du risque de non-permanence	20
6.1. Risque de dépérissement/inadéquation à la station	21

6.1.1.	Adéquation des essences à la station	21
6.2.	Risques liés à l'incertitude de la coupe rase du scénario de référence	21
6.3.	Risques liés au maintien du scénario projet.....	21
6.3.1.	Risques liés au marché	21
6.3.2.	Risque lié à la technicité du scénario irrégularisation	22
6.3.3.	Risque lié à l'engagement dans le projet	22
6.4.	Risques liés aux aléas exceptionnels	23
6.4.1.	Risque incendie	23
6.4.2.	Risque tempête	25
6.5.	Synthèse des risques.....	25
7.	Calcul du stockage carbone additionnel générables	26
8.	Quantification carbone des itinéraires	26
8.1.	Modélisation de l'évolution du carbone dans le scénario de référence	27
8.2.	Modélisation de l'évolution du carbone dans l'itinéraire projet.....	27
8.3.	Calculateur carbone	28
8.4.	Données d'entrée du calculateur	30
9.	Calendrier, vérifications et attribution des RE	31
9.1.	Calendrier de mise en œuvre et de suivi de projet.....	31
9.2.	Processus d'instruction et d'audit.....	32
9.2.1.	Instruction auprès des DREAL.....	32
9.2.2.	Audit initial (N+5).....	33
9.2.3.	Audits simplifiés de suivi (N+10 et N+20 ou N+15 pour le taillis)	33
9.2.4.	Audits final (N+30 ou 20 le cas échéant)	33
9.3.	Vérification documentaire par un auditeur.....	34
9.4.	Rapport de vérification.....	34
9.5.	Liste des auditeurs	35
9.6.	Attribution des réductions d'émission par l'autorité	35
10.	Co-bénéfices.....	37
11.	Références bibliographiques	39
12.	Annexe 1 – Annexe technique d'estimation carbone	40
1.	Principes de l'estimation et compartiments intégrés	41
2.	Forme et accessibilité du calculateur PRM	45
3.	Choix méthodologiques.....	46
3.1.	Approche générale.....	46
3.2.	Biomasse vivante des arbres (Bv)	48
3.2.1.	Approche théorique et implications pour la méthode.....	48

3.2.2. Production brute - principes de base.....	49
3.2.3. Modèles de croissance en hauteur	50
3.2.4. Modèles de croissance en surface terrière	53
3.2.5. Evolution de la biomasse vivante totale des arbres	54
3.3. Biomasse du sous-étage (Bvs).....	55
3.4. Biomasse Morte (Bm)	56
3.5. Carbone du sol (S).....	58
3.5.1. Approche globale.....	58
3.5.2. Stock initial.....	58
3.5.3. Variations de stock sur 30 ans	60
3.6. Produits-Bois (Pb)	62
3.6.1. Volumes de produits récoltés	62
3.6.2. Stock de carbone généré.....	63
3.7. Contenu en carbone du bois	64
4. Intégration des paramètres des scénarios sylvicoles.....	64
5. Synthèse opérationnelle.....	65
13. Annexe 2 – Exemple de modélisations à partir des données IGN.....	71

Table des illustrations

Tableau 1 - Les puits et sources de carbone à inclure selon les compartiments forestiers	7
Tableau 4 - Critères d'éligibilité pour les essences vulnérables	11
Tableau 2 - Diamètres minimums pour atteindre le terme d'exploitabilité des essences (France entière et Corse)	12
Tableau 3 - Surface terrière minimum du peuplement, composée à au moins 70% d'arbres ayant atteint le terme d'exploitabilité.....	12
Tableau 5 - Capital minimal d'équilibre cible en fin de projet Irrégularisation (selon les recherches de AFI croisées avec des réseaux européens(ex. programme Askafor), disponibles sur prosilva.fr)	22
Tableau 7 - Synthèse des risques pris en compte dans la méthode	25
Tableau 8 - Paramètres pris en compte par le calculateur "PRM"	29
Tableau 9 - Exemple de calendrier de projet.....	32
Tableau 10 - Tableau d'attribution des REE en fonction des différents scénarios de la méthode.....	36
Tableau 11 – Liste et attribution des points des co-bénéfices	38

1. Préambule

Ce document est une méthode pour des projets volontaires d'évitement du recours à la coupe rase dans le cadre du Label bas-carbone français, issu de la coopération entre l'Association Futaie Irrégulière (AFI), Pro Silva France et la Société Forestière de la CDC (SFCDC), et approuvé par le Ministère de la Transition Ecologique et de la Cohésion des Territoires (MTECT).

Cette méthode indique les différentes étapes à suivre pour la réalisation de projets de maintien d'un couvert continu compatibles avec le label Bas-Carbone, permettant de développer les différents leviers d'atténuation du changement climatique dans la filière forêt-bois.

1.1. Contexte

Le projet de méthode part du constat que de nombreux peuplements forestiers réguliers et/ou équiens atteignent actuellement, ou atteindront dans les années à venir, un premier niveau de maturité économique, les rendant techniquement exploitables sur des récoltes en plein.

Pour ce qui concerne les peuplements résineux plantés, cette réalité découle en grande partie des politiques de reforestation mises en œuvre après la Seconde Guerre mondiale, le Fonds Forestier National (FFN) jouant un rôle central dans la conversion des terres en déprise agricole sur de vastes espaces forestiers. De 1946 à 1999, le financement du FFN a permis de (re)boiser 2,3 millions d'hectares en France hexagonale. Les premières essences éligibles à ces financements étaient essentiellement des résineux (Pins, Epicéas, Douglas et Sapins), qui ont été introduits en très grande majorité des surfaces financées. Il est important de noter que bon nombre de ces boisements FFN étaient essentiellement monospécifiques, ce qui impacte les enjeux de biodiversité et de résilience écologique. Les peuplements résineux sont généralement menés sur des révolutions assez courtes (allant de 35 à 70 ans) et permettent ainsi d'alimenter la filière bois avec des produits standardisés correspondant aux besoins industriels majoritaires actuels. Le caractère monospécifique et équien de ces plantations favorise les itinéraires techniques de renouvellement par coupe rase et plantation.

Cependant, la maturité physiologique de ces peuplements n'est pas atteinte, leur potentiel sylvicole (production biologique plus importante) n'est pas optimisé. Cela soulève des questions sur la manière optimale de gérer ces forêts dans le contexte actuel, en tenant compte des impératifs environnementaux et économiques, puisqu'à ce stade ils agissent encore comme un levier dans la séquestration carbone, la biodiversité s'y développe et leur aspect paysager devient attrayant. L'enjeu est donc de pouvoir maintenir ces peuplements plus longtemps, par le biais de coupes d'améliorations successives et par ailleurs, de continuer à assurer un rôle de fourniture de produits bois, en évitant un « trou de production » produit par une exploitation anticipée.

Pour ce qui concerne les peuplements feuillus traités en taillis simple, cette réalité découle des différentes périodes de coupes rases qui se sont succédées après-guerre et dans les dernières décennies – sans éclaircies d'amélioration. Pourtant, de belles expériences sur toute la France ont montré qu'une sylviculture d'amélioration est généralement possible afin de convertir ces taillis en futaies ou mélanges futaie-taillis et donc d'améliorer la capacité de stockage carbone. La méthode

bas-carbone Balivage du CNPF permet de convertir en une fois les plus belles parcelles à un jeune stade de leur développement physiologique, mais elle n'est pas utilisable dans toutes les conditions, en particulier dans les taillis dits "vieillis", ou "adultes" – au risque que la transition soit trop brutale pour la pérennité du peuplement.

Cette méthode vient compenser le manque actuel d'aides publiques pour mener à bien ces opérations de transition, ainsi qu'aider à la « patience » nécessaire pour transiter depuis les faciès actuels vers des faciès plus diversifiés en structures (hauteurs), en âges, en espèces, en dimensions, en qualité et en éléments de fonctionnalité écologique au sens large (incluant l'amélioration lente de la productivité des sols, eux-mêmes protégés de la dégradation par un couvert maintenu en continu).

Ainsi la méthode Label bas-carbone « Maintien de peuplements forestiers par couvert continu » se positionne comme une réponse équilibrée aux défis environnementaux et sociaux actuels et à venir. Elle complète le panel des méthodes existantes, pour offrir des alternatives de gestion et de valorisation multifonctionnelle qui permettent une additionnalité carbone en évitant notamment le déstockage dû à la coupe rase, mais aussi en augmentant le stockage et la séquestration dans les arbres sur pied et dans les produits récoltés. Cette méthode s'apparente à une « sylviculture de la patience et de la transition » qu'il convient d'aider au démarrage, pour accompagner les propriétaires qui, dépassant leurs potentiels intérêts économiques à court terme, souhaiteraient engager leurs forêts vers une sylviculture permettant plus de multifonctionnalité à court, moyen et long terme.

1.2. Rédacteurs

Ce projet de méthode Label bas-carbone est issu de la coopération du consortium entre l'Association Futaie Irrégulière (AFI), l'association Pro Silva France (PSF) et la Société Forestière de la CDC (SFCDC).

Le comité technique à l'initiative de la rédaction de cette méthode et à l'ingénierie carbone associée est composée de :

- Marie-Laure Martin-Bellier, Eric Boittin et Julien Tomasini pour l'Association Futaie Irrégulière ;
- Nicolas Luigi et Gaëtan du Bus de Warnaffe pour Pro Silva France ;
- Kévin Brice et Ceydric Sedilot-Gasmi pour la Société Forestière.

1.3. Remerciements

Cette méthode a été développée et renforcée grâce aux apports et conseils d'un comité de pilotage qui s'est réuni à de nombreuses reprises pendant deux ans. Les rédacteurs souhaitent remercier sincèrement les personnes qui composent ce comité pour leurs précieuses contributions :

- Max Bruciamacchie (AgroParisTech), Christine Deleuze et Salomé Fournier (ONF), Julia Grimault et Adeline Favrel (I4CE), Simon Martel (CNPFF/I4CE), Olivier Gleizes et Hippolyte Reignier (CNPFF), Hortense Wiart (Fransylva), Daniel Vallauri (WWF), Nicolas Oddo et Sarah Khatib (France Nature Environnement), Marianne Bernard (Office Français de la Biodiversité), Valentin Bellassen (INRAe), Nicolas Goux (CEN Occitanie), Thomas Stannard et Hugo Senges (Fédération des CEN), Oliver Forsans (MaForêt), Justine Campredon, Carole Renner et Thibaud Poulain (Reforest'Action), Pauline Favre (Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté

Alimentaire), Virginie Charbonnier (Région Auvergne-Rhône-Alpes), Claire Faroux et Gildas Toullec (Région Occitanie), Jean Croisel (Région Bourgogne-Franche-Comté).

D'autres ont également donné de leur temps, expertise et soutien dans cette méthode hors instances de travail, à travers des discussions parallèles, échanges techniques et tournées terrain qui ont permis d'alimenter l'ensemble des réflexions. Les rédacteurs tiennent à remercier :

- Evrard de Turckheim et Margot Gessen (Pro Silva France), Amaury Janny et Fabien Moncharmont (Société Forestière), Olivier Chandioux (Alcina), Olivier Pain, Jean-Baptiste Susse (Experts forestiers), Renaud Bettin (Sweep), Luc Abbadie (Université de la Sorbonne), ainsi que l'équipe de la Direction Générale de l'Energie et du Climat du MTECT, à savoir Jean Sevestre, Maguelonne Joubin, Charles Chevalier, Charles Tissot, Maud Berel, Chloé Perdereau et Sidonie Blanchard pour les échanges constructifs ou pour les participations aux COPIL ;
- Benoit Leguet et Clothilde Tronquet (I4CE) et les membres du Club Climat, pour avoir permis de présenter la méthode à plusieurs reprises et favorisé ainsi les discussions de tous horizons : forestiers, agricoles et financeurs ;
- Ainsi que l'ensemble des gestionnaires forestiers, experts forestiers, membres de l'ONF, du CNPF ou techniciens de coopératives qui ont répondu à l'enquête réalisée sur les termes d'exploitabilité des peuplements concernés et qui ont ainsi contribué à fixer un scénario de référence réaliste et robuste.

Le consortium remercie également les régions Occitanie, Bourgogne – Franche-Comté, Auvergne-Rhône-Alpes et Reforest'action pour leur soutien financier dans le développement de cette méthode.

1.4. Evolution continue

Cette méthode est évolutive et intégrera, à l'occasion de mises à jour, de nouvelles données scientifiques et retours d'expérience, permettant d'appréhender plus précisément l'éligibilité des peuplements (essences supplémentaires, vulnérabilité...), la comptabilisation des réductions d'émissions générées (données IGN, affinage des équations et paramètres), la qualification des co-bénéfices ou encore l'applicabilité de la méthode à toutes les régions climatiques.

Elles pourront également inclure des amendements concernant l'applicabilité des projets et les critères d'éligibilité.

2. Applicabilité, définitions, durée

Cette méthode s'applique à des projets forestiers ayant vocation à lutter contre le changement climatique, en France métropolitaine (ensemble du territoire hexagonal et Corse).

Une **surface minimale de projet est fixée à 2 ha** pour une parcelle ou groupe de parcelles attenantes. Il n'existe pas de limite supérieure en termes de superficie totale de projet. Il en découle les définitions suivantes.

2.1. Maintien de peuplements forestiers par couvert continu

On entend par « **maintien de peuplements forestiers par couvert continu** » une sylviculture appliquée à des peuplements forestiers préexistants, pour lesquels une stratégie d'évitement de la coupe rase est mise en place afin de conserver un couvert forestier sur le sol sur une durée nettement plus longue que celle des révolutions majoritairement mises en œuvre en futaie régulière ou en taillis simple.

Ce maintien d'un couvert continu peut être obtenu par deux types de sylvicultures, avec des objectifs finaux différents, mais dont les actions sont très proches sur la période de portage du projet :

- Une sylviculture dédiée à **l'irrégularisation des peuplements** à partir de futaies régulières et équiennes résineuses ou de taillis : cette méthode aboutit à appliquer les principes d'un traitement irrégulier sur la durée du projet, qui correspond à une période transitoire moyenne entre un état de départ et un état dit « d'équilibre », avec un peuplement plus structuré ;
- Une sylviculture dédiée à **l'allongement des cycles de production**, avec maintien temporaire ou définitif d'un traitement régulier en peuplements résineux, ou la transition de taillis simple âgés vers une futaie sur souche (avec francs-pieds) mélangée. Dans le cas des résineux cette méthode aboutit à un renouvellement par régénération naturelle en plein, complétée par des enrichissements ponctuels, ou en cas d'échec, par régénération artificielle complète.

Les deux itinéraires sylvicoles proposés permettent de profiter d'une production biologique des peuplements plus importante que dans les jeunes stades et donc d'obtenir une additionnalité sur le long terme du stockage carbone des peuplements mais également dans les sols. Par ailleurs, le rôle de production et de fourniture de produits-bois au cours du temps est maintenu, participant par là à l'atténuation d'un potentiel « trou de production » attendu avec l'arrivée massive des plantations FFN à des premiers stades de récolte, mais aussi des récoltes anticipées passées à la suite des différents aléas (tempêtes, incendies, crise scolyte...). Ces deux itinéraires sylvicoles participent donc à la sécurisation de l'approvisionnement des entreprises de transformation, par un « étalement temporel et spatial » des récoltes. Par simplification, nous utiliserons par la suite le terme de « **Couverts forestiers continus** » pour désigner ces deux sylvicultures.

2.1.1. Par irrégularisation des peuplements

Les peuplements réguliers/équiens et les taillis peuvent être « convertis » progressivement vers des peuplements de structure horizontale (répartition des catégories de diamètres) et surtout verticale (proportions de houppier vert et optimisation de la photosynthèse sur plusieurs strates) diversifiées. Cette conversion se fait à partir d'une sylviculture optant pour les principes du traitement irrégulier ou jardinatoire (coupes fréquentes et légères, travaux ciblés, maintien ou atteinte d'un capital dans une fourchette objectif optimale, recherche de mélanges d'essences fonctionnels, amélioration ciblée de la qualité, avec maintien d'une ambiance forestière, intégration ou maintien d'éléments de fonctionnalité écologique...). Cette phase transitoire de conversion nécessite le maintien du capital sur pied et une hausse des diamètres d'exploitabilité, appliqués à chaque arbre plutôt qu'avec une logique de dimensions moyenne à la parcelle.

Cette transition va permettre, conjointement, l'installation progressive d'une régénération naturelle et/ou assistée, gage d'une couverture forestière continue et d'une transformation progressive des

peuplements, ainsi qu'une maturation parallèle des sols et des éléments de fonctionnalité écologique associés.

Cette stratégie sylvicole globale est complémentaire des stratégies adaptatives plus « rapides », consistant à transformer d'un coup des peuplements, avec une mise en marché immédiate des bois concernés et une transformation rapide, par substitution immédiate d'espèces.

Cet itinéraire sera fortement valorisé par la mise en place des co-bénéfices, puisqu'il permet d'améliorer notamment les composantes liées à la biodiversité, la protection des sols et les enjeux sociétaux. Il présente aussi l'avantage d'une grande souplesse, résilience et réversibilité des choix.

2.1.2. Par allongement des cycles de production

Les peuplements réguliers et/ou équiens sont souvent récoltés à une année de récolte correspondant à un âge de maturité économique et non un âge de maturité sexuelle (et par extension physiologique) de l'arbre qui permet d'obtenir une régénération naturelle. La récolte est donc anticipée au regard de l'optimum de ces arbres.

Cette variante consiste à décaler l'année de la coupe définitive (complète) de 20 à 30 ans par rapport à une révolution classique pour l'essence considérée. La sylviculture dédiée à l'allongement du cycle de production permettra ainsi d'atteindre une plus grande maturité sexuelle et physiologique de ces peuplements. Les améliorations du peuplement continuent d'avoir lieu durant les 30 ans supplémentaires dédiés au projet, continuant ainsi la mise en marché des bois par éclaircies et une amélioration progressive de la valeur du capital restant. La sylviculture déployée a donc pour conséquence de permettre l'installation de la régénération naturelle, mais aussi une amélioration de la valeur des bois restants et un maintien de toutes les fonctions écologiques afférentes au couvert continu et à la maturation des sols, *a minima* pendant la durée du projet.

Ainsi, à la fin du projet, trois situations concernant la gestion des peuplements concernés seront possibles :

- La régénération naturelle est acquise et permet le renouvellement et la continuité de la gestion du peuplement, sans mise à nu du sol et en conservant le maximum de carbone stocké dans le sol – ce scénario comportera le maximum de co-bénéfices, il s'agit du scénario cible ;
- La régénération naturelle et/ou assistée n'a pas pu être obtenue, une plantation est donc nécessaire pour assurer le renouvellement du peuplement. Cette phase de plantation entraîne une mise à nu du sol forestier et par conséquent un déstockage du carbone présent – ce scénario comporte le minimum de co-bénéfices ;
- Un scénario intermédiaire consiste en une régénération naturelle partiellement acquise, qui nécessite un complément par des reboisements en enrichissements surfaciques ou par des plantations en points d'appui – ce scénario comporte des co-bénéfices intermédiaires.

2.2. Durée de projet

La durée pour un projet est modulable en fonction de l'état d'avancée du peuplement au démarrage du projet, selon les modalités suivantes :

- **30 ans pour l'ensemble des projets éligibles en futaie résineuse et en taillis ;**
- Par exception, **20 ans pour les peuplements résineux éligibles avec au moins 70% de Gros Bois (GB) et Très Gros Bois (TGB)** en surface terrière et qui montrent une dynamique de régénération naturelle en cours sur au moins 30% de la surface (stades semis, fourrés, gaulis et/ou perchis), laissant supposer un couvert continu¹ obtenu en fin de projet.

Cette durée est celle utilisée pour le calcul des réductions d'émission (RE) générables par le projet.

Tous les engagements du porteur de projet reposent *a minima* sur cette période. Il en découle que le Porteur de projet s'engage à respecter l'état boisé pendant le délai du projet et s'engage à informer toutes les parties prenantes du projet en cas de non-respect des objectifs fixés.

2.3. Le Porteur de projet

Le porteur de projet est la personne qui a la capacité juridique de mettre en œuvre le projet (dans le cas d'un boisement il s'agit du propriétaire du terrain ou de celui qui a la maîtrise foncière, par un contrat ou un statut).

Le demandeur est l'entité qui fait la demande de labellisation auprès de l'autorité compétente (entité en charge de l'instruction). Il est soit le porteur de projet, soit un mandataire du porteur de projet chargé de le représenter (cf. articles 1984 et suivants du Code civil relatifs au contrat de mandat).

Toute personne, qu'elle soit de droit privé ou de droit public, peut être un porteur de projet.

Cela peut être un propriétaire en nom propre, une association de regroupement des propriétaires forestiers (ASL, ASLGF...), un groupement forestier (de petits porteurs, familial...), un groupement foncier agricole (GFA), un groupement foncier rural (GFR), toute société civile immobilière (SCI), une indivision, une fondation, une association, un établissement public, un EPCI, une collectivité (propriétaire de forêt communale, départementale, sectionale, etc.), l'État (forêts domaniales) ...

Le porteur de projet peut se faire aider par un mandataire pour remplir le document de projet (Expert forestier, gestionnaire forestier professionnel, ONF, coopérative forestière...) agissant dans ce cas comme maître d'ouvrage délégué lors du dépôt du dossier.

¹ par « couvert continu » on entend ici le maintien d'une ambiance forestière interne, favorable à l'atténuation des écarts thermiques saisonniers et journaliers. On estime que cette ambiance forestière est assurée à partir du stade du gaulis voire perchis, à l'échelle de chaque arbre, et donc par extension à l'échelle de chaque zone / cônes et surfaces en régénération dans le peuplement. Les stades préalables ne participent que peu, voire pas du tout, au maintien d'une ambiance forestière telle que définie. D'où l'approche proposée, d'une projection de la régénération naturelle existante sur la durée du projet, jusqu'aux stades minimaux jugés constitutifs d'une ambiance forestière interne (stade « fourré » au démarrage, pour atteindre des stades « gaulis », « perchis », voire « petits bois » au bout des 30 ans).

2.4. Sélection des sources/puits et compartiments

Les compartiments retenus pour la quantification du carbone sont définis dans le tableau suivant.

La comptabilisation des crédits se fait selon **une méthodologie ex-post**. Il s'agit donc de crédits dont les réductions d'émissions sont constatées et vérifiées, sur la base d'audits effectués par des tiers, permettant de quantifier la production des peuplements qui a été effective depuis le départ du projet. Une comptabilisation *ex-post* permet ainsi d'éviter de nombreux rabais liés à des incertitudes fortes anticipées.

Tout comptabilisation *ex-post* est toutefois associée à une estimation initiale *ex-ante* permettant de quantifier le point de départ puis l'évolution initiale des « trajectoires carbone » attendues. Cette quantification carbone doit permettre ainsi d'obtenir un effet levier pour le financement des projets.

Dans les différents compartiments carbone estimés, on distingue plusieurs types de réductions d'émissions, en fonction de leurs caractéristiques propres.

Tableau 1 - Les puits et sources de carbone à inclure selon les compartiments forestiers

Source/Puits	GES	Inclusion	Type de RE comptabilisé
Séquestration de carbone dans la biomasse aérienne	CO ₂	Oui	Constatées (mesures)
Séquestration de carbone dans la biomasse racinaire	CO ₂	Oui	Estimées (littérature)
Séquestration de carbone dans le bois mort	CO ₂	Oui	Constatées par mesures
Séquestration de carbone dans la litière	CO ₂	Oui	Estimées (littérature)
Séquestration de carbone dans le sol	CO ₂	Oui	Estimées (littérature)
Séquestration dans les produits bois	CO ₂	Oui	Estimées (récoltes)
Substitution à des produits ou énergies plus émetteurs que le bois	CO ₂ CH ₄	Non	Non comptabilisé
Emissions liées à la gestion forestière	CO ₂	Non	Estimées (littérature)

Les effets d'atténuation habituels sont souvent résumés par le signe « 3S » : séquestration dans l'écosystème, stockage dans les produits bois, substitution grâce aux produits bois. Cependant, les réflexions menées lors du COPIL ont abouti à un traitement différent de l'effet substitution par rapport

aux méthodologies actuelles et n'est pas comptabilisé dans la présente méthode. Le détail est présenté dans l'annexe technique de l'estimation carbone (Annexe 1).

Cette méthode préconise l'intégration systématique des réservoirs de la biomasse aérienne et racinaire de la strate arborée. Les réservoirs de la litière et du sol sont pris en compte ainsi que celui du bois mort. La dette carbone survenue à la suite d'une coupe rase (GIP ECOFOR, RMT AFORCE 2023) est prise en compte dans le scénario de référence.

Il faut normalement aussi considérer les émissions générées par la récolte du bois et les travaux sylvicoles (ex. plantation). Cependant l'état actuel des connaissances ne permet pas d'attribuer des valeurs fiables selon le scénario de gestion. En effet à ce stade il n'existe pas encore de quantification des émissions liées à l'exploitation forestière suivant les sylvicultures et les itinéraires, qui iraient de 0,12 à 0,56 t-eqCO₂/ha/an selon les espèces (Brunori et al. 2017; Sara González-García et al. 2014; S. González-García et al. 2014; Sara González-García et al. 2013). A défaut de pouvoir chiffrer ces impacts, dans cette méthode comparant un scénario de référence et projet avec exploitation, nous considérerons les émissions comparables donc sans additionnalité.

3. Critères d'éligibilité

Cette partie détermine les éléments à fournir pour qu'un projet soit éligible à la méthode « Couverts forestiers continus ». Si une des conditions sous-mentionnées manque lors du dépôt de dossier, **celui-ci sera systématiquement rejeté par l'Autorité**. Toutefois, le Porteur de projet pourra corriger les éléments manquants de son dossier et faire un nouveau dépôt.

3.1. Pièces à fournir

Le porteur de projet devra fournir les pièces suivantes :

- Document 1 : Une matrice cadastrale de moins d'un an ou une attestation notariale justifiant la propriété des parcelles objet du projet.
 - Document 1bis (conditionnel) : Dans le cas d'un porteur de projet non-propriétaire, un document signé du ou des propriétaires, démontrant son habilitation à disposer des parcelles du projet ;
 - Document 1ter (conditionnel) : Dans le cas d'une structure de regroupement de propriétaires (type ASL) ou de la gérance d'une société (GF, SCI...), une délibération attestant de l'habilitation du représentant ou du gérant doit être jointe.
- Document 2 (conditionnel) : Mandat si une tierce entité représente le porteur de projet auprès de l'administration pour la demande de labellisation (maitrise d'ouvrage déléguée) ;
- Document 3A : Orthophoto récente et nette du projet, avec date et source, qui représente l'emprise exacte du projet avec superposition du fond cadastral prouvant la nature boisée de la parcelle, sans aplats de couleur ;
- Document 3B : Photographies in situ des parcelles : photos prises à hauteur d'homme, datées de moins d'un an, avec indication des parcelles et de l'orientation, ainsi que de la date de prise de vue (mois, année) et la localisation afin de prouver le type de peuplement en place ;

- Document 4 : Justificatif de document de gestion durable agréé en cours de validité (CBPS, RTG, PSG pour les forêts privées ou document d'aménagement pour les forêts publiques) ou en cours de rédaction ;
- Document 5A : Attestation justifiant l'adéquation du peuplement à la station et justification de la classe de fertilité choisie au regard des caractéristiques de la station pour l'essence considérée ;
- Document 5B (conditionnel) : Diagnostic DEPERIS en cas d'essence considérée comme vulnérable sur la station concernée ;
- Document 5 : Diagnostic IBP des parcelles forestières du projet, daté et signé ;
- Document 6 (conditionnel) : Extrait du PDPFCI avec localisation du massif sur la carte, a minima indiqué par une flèche
- Document 7 : Tableur récapitulatif des co-bénéfices ;
- Document 8 : Fiche récapitulative du stockage additionnel obtenue à partir du calculateur spécifiquement développé pour la méthode, hébergée sur le site : [R SHINY](#) ;
- Document 9 : Données dendrométriques (terrain) ayant servi à l'établissement de la fiche récapitulative ;
- Document 10 : Lettre d'engagements du porteur de projet.

En outre, le porteur de projet doit présenter un document de gestion durable (aménagement forestier, plan simple de gestion, règlement type de gestion ou code de bonnes pratiques sylvicoles).

Au titre des articles L124- 1 et L124-2 du Code forestier, ces documents présentent des garanties de gestion durable (aménagement, PSG, RTG) ou des présomptions de garantie de gestion durable (CBPS). Comme justificatif, le Porteur de projet devra fournir :

- Pour une forêt dotée d'un PSG, la décision d'agrément du PSG par le conseil de centre du CNPF, ou *a minima* à l'accusé de réception du CNPF ;
- Pour une forêt dotée d'un CBPS avec programme de coupe et travaux, le courrier du CNPF notifiant l'adhésion du propriétaire au code de bonnes pratiques sylvicoles ;
- Pour une forêt dotée d'un RTG, la décision d'agrément du RTG par le conseil de centre du CNPF et l'adhésion du propriétaire au RTG (signée par le propriétaire et le rédacteur) ou, en son absence, la copie du RTG ;
- Pour toute forêt de collectivité, l'arrêté d'aménagement portant approbation du document d'aménagement de la forêt de la collectivité par le préfet de Région ;
- Pour toute forêt domaniale, l'arrêté d'aménagement portant approbation du document d'aménagement de la forêt domaniale par le ministre en charge des forêts.

Le cas échéant, et afin d'être en conformité avec la législation, le Porteur de projet s'assurera de modifier le tableau de coupes et travaux de son document de gestion durable par avenant ou lors du renouvellement de celui-ci s'il intervient dans les 5 ans après le début du projet, voir à procéder à des demandes d'autorisation de coupes.

3.2. Éligibilité des projets

Seuls les projets dont la viabilité du peuplement en place est escomptée sur la durée du projet pourront être éligibles à la méthode « Couverts forestiers continus ».

3.2.1. Adéquation des peuplements à la station et au changement climatique

Les peuplements monospécifiques d'espèces connaissant des crises sanitaires majeures devront faire l'objet d'un diagnostic spécifique, afin de vérifier que la mise en œuvre de la méthode au sein de ces peuplements est réaliste, hors aléas exceptionnels.

Le diagnostic comportera les éléments suivants :

- Un diagnostic stationnel confortant la bonne adéquation de l'essence à la station produit par un professionnel de la gestion forestière reconnu, et/ou ;
- Une simulation des impacts du changement climatique sur les essences concernées, à partir d'outils reconnus tels que Clim'Essence en scénario RCP4.5moyen (avec possible compensation en versant nord ou cuvette) ou BioClimSol en scénario +2°C, ou de guides stationnels intégrant ces projections futures.

Ces diagnostics pourront être appuyés par l'utilisation de guides stationnels adaptés aux territoires, mais une analyse claire basée sur des éléments climatologiques, topographiques et pédologiques est suffisante.

Les éléments de diagnostic stationnel doivent reprendre à minima les données suivantes :

- Topographie : altitude, exposition et situation topographique ;
- Climatologie : Type de climat, température et pluviométrie annuelle, répartition estivale de la pluviométrie, nombre de jours de gel, station de référence, en utilisant une temporalité des données adaptée ;
- Pédologie : Description des horizons (textures, profondeurs...), description des facteurs limitants (présence d'hydromorphie, pourcentage d'éléments grossiers, calcaire actif) et calcul de réserve utile.

Ces éléments permettront de définir une ou plusieurs stations en fonction de relevés terrain ou à l'aide d'une clef de décision produite dans les guides stationnels, permettant de vérifier l'adéquation de l'essence sur la durée du projet.

Certaines essences, comportant des risques prépondérants et étant considérées comme vulnérables ne seront éligibles que sous certaines conditions décrites au paragraphe suivant.

3.2.2. Cas des essences vulnérables

Au vu de l'état sanitaire actuel et des changements climatiques, certaines essences sont d'ores et déjà considérées comme vulnérables, puisqu'elles présentent un fort risque de dépérissement sous certaines conditions stationnelles et altitudinales. Malgré une description de la station favorable, des diagnostics supplémentaires sont à intégrer pour vérifier l'éligibilité de ces essences.

Les peuplements composés à plus de 50 % de ces essences dites vulnérables, dans les conditions jugées dans le tableau ci-après, seront considérées soit comme :

- Inadaptées à leur maintien sur le moyen ou long terme donc non-éligibles à la présente méthode ;
- À risque avec un maintien sur le moyen terme éligible à la méthode sous certaines conditions.

Pour être éligibles, les peuplements doivent donc répondre à la fois aux critères stationnels et au diagnostic sanitaire selon les modalités suivantes :

Tableau 2 - Critères d'éligibilité pour les essences vulnérables

Essence vulnérable	Exclusion sur critères stationnels	Exclusion sur critères sanitaires
Epicéa commun	Présence < 600 m d'altitude	Plus de 15% des arbres en classes DEPERIS D, E ou F
Sapin pectiné	Présence < 400 m d'altitude	
Châtaignier	Non concerné	
Hêtre	Non concerné	Exclu dans tous les cas
Frêne	Exclu pour toute la France	

3.2.3. Critères minimums d'exploitabilité

La présente méthode vise à maintenir des peuplements forestiers en place sur le long terme en évitant la coupe rase. Seuls sont éligibles les peuplements qui auraient pu faire l'objet, dans la durée du projet, d'une coupe rase autre que sanitaire et/ou liées à un événement ou aléa exceptionnel imprévisible.

Les peuplements concernés par ces scénarios sont des **peuplements adultes dont le propriétaire souhaite éviter la coupe rase et dont le terme d'exploitabilité minimal défini par le diamètre de l'essence est dépassé.**

Le terme d'exploitabilité de récolte moyen des essences a été défini sur une base documentaire (DRA, SRA, SRGS...), statistiques (données IGN-IFN) puis confortée par une enquête auprès des gestionnaires forestiers issus de divers horizons. Les diamètres minimums ont ensuite été réhaussés de 2,5 cm afin que cela corresponde à l'entrée dans une classe de diamètre (de 5 en 5) et afin de prendre une précaution supplémentaire vis-à-vis du scénario de référence.

Le tableau ci-après présente les diamètres minimaux pratiqués pour les récoltes des différentes essences pour que l'éligibilité soit vérifiée à l'échelle de la France.

Tableau 3 - Diamètres minimums pour atteindre le terme d'exploitabilité des essences (France entière et Corse)

Diamètre (cm) au-delà duquel il faut plus de 70% de la surface terrière totale du peuplement (Futaie/Taillis)	
Douglas, Sapin pectiné (F), Mélèze d'Europe (F)	42,5
Pins maritime, laricio et noir d'Autriche, Cèdre de l'Atlas, Epicéas C/S (F)	37,5
Pin d'Alep (F)	32,5
Chênes pédonculé et sessile (T)	27,5
Chêne pubescent, châtaignier, hêtre (T)	27,5 (22,5) ²
Chêne vert, Robinier (T)	22,5

La surface terrière du peuplement est composée au moins à 70% d'arbres ayant un diamètre supérieur au diamètre minimum d'exploitabilité défini par le tableau ci-dessus.

Afin de justifier de la pérennité du peuplement, un critère de richesse est établi : la surface terrière totale doit dépasser les seuils ci-dessous, définis en fonction d'une surface terrière de référence par essence. Ce seuil permet d'éviter les risques de dépérissement dus à une vulnérabilité accrue aux canicules et sécheresses en peuplements clairs et répond au besoin d'un couvert suffisant pour la germination des semis (sol « propre »), et donc, *in fine*, assurer le renouvellement par couvert continu.

Pour les cas particuliers des peuplements à Gros Bois (GB) et Très Gros Bois (TGB) (diamètre moyen supérieur à 47,5 cm) ce critère est abaissé selon le tableau ci-dessous. Il s'agit de peuplements spécifiques avec une régénération naturelle doit être constatée au moins 30% de la surface (stades semis, fourrés, gaulis et/ou perchis), laissant supposer un couvert continu obtenu en fin de projet.

Le tableau suivant récapitule les surfaces terrières à atteindre pour qu'un projet soit éligible :

Tableau 4 - Surface terrière minimum du peuplement, composée à au moins 70% d'arbres ayant atteint le terme d'exploitabilité

Capital minimum d'entrée du projet en Futaie et Taillis (surface terrière en m ² /ha) ³		
Essences	Minimum	Dérogation GB/TGB ⁴
Douglas, sapin, épicéa	26	18
Pins, mélèze, cèdre	18	12
Hêtre, châtaignier, robinier	15	-
Chênes	11	-

² Pour le chêne pubescent en GRECO H, J et K (Méditerranée et Corse)

³ Diamètre de précomptage 17,5cm sauf en GRECO Méditerranée (12,5cm).

⁴ Définition GB/TGB : plus de 70% de G en GB et TGB et fourré minimum sur 30% (notion d'ambiance forestière)

3.2.4. Prise des données sur le terrain

L'ensemble des données récoltées et utilisées dans le cadre du scénario de projet et de la définition de l'éligibilité sont documentées et archivées. Elles feront l'objet d'un audit spécifique. Les relevés terrain se basent soit sur des inventaires en plein ou des inventaires statistiques avec une erreur relative inférieure à 8 % sur la surface terrière et la composition en essences. Chaque parcelle concernée par le projet doit être inventoriée selon une des deux méthodes et devra recenser les surfaces terrières en bois vivant, les hauteurs dominantes, le volume initial de bois mort, la répartition des produits et fournir un diagnostic DEPERIS le cas échéant.

Une prise de donnée de plus de 2 ans avant la notification du projet ne sera pas recevable.

Ces modalités de prises de données s'appliquent aussi bien pour l'instruction du projet, que lors des différentes vérifications faites soit par l'auditeur soit par le porteur de projet.

4. Choix du scénario de référence et démonstration de l'additionnalité

4.1. Choix du scénario de référence

L'article 9 de l'arrêté du 2 mars 2007⁵ précise que « *le scénario de référence correspond au niveau des émissions [ici des absorptions] de gaz à effet de serre qui aurait été vraisemblablement atteint par une activité s'exerçant conformément aux dispositions législatives et réglementaires en vigueur applicables à l'activité de projet concernée à la date du dépôt de dossier, et faisant usage des incitations économiques en vigueur à cette même date* ».

Le scénario de projet décrit la sylviculture avec maintien du couvert du type de peuplement éligible. Le scénario de référence correspond à la **récolte complète et au renouvellement en plein par plantation (cas des plantations résineuses régulières/équiennes) ou par recépage (cas des taillis) de ce peuplement en début de projet.**

Pour la plantation, les calculs de réduction d'émission s'appuieront sur une essence au moins aussi productive que l'essence dominante du peuplement du scénario de projet.

La durée du scénario de référence sera équivalente à celle du scénario projet et débutera aux mêmes années.

⁵ [Arrêté du 2 mars 2007 pris pour l'application des articles 3 à 5 du décret n° 2006-622 du 29 mai 2006 et relatif à l'agrément des activités de projet relevant des articles 6 et 12 du protocole de Kyoto](#)

4.2. Démonstration de l'additionnalité

L'additionnalité consistera à démontrer que le projet va au-delà des obligations légales et des pratiques courantes et qu'en l'absence de participation d'un financeur, *via* le soutien financier des réductions d'émissions estimées puis vérifiées, le projet de maintien d'un peuplement mature n'aurait pas pu voir le jour, à cause de barrières économiques, culturelles et techniques, ou d'une anticipation de récolte dans une logique de rentabilité immédiate sans prise de risque.

Le financement de l'additionnalité carbone du scénario projet permet d'engager la conversion vers des peuplements pluri-strates et mélangés ou l'allongement de la révolution, avec tous ses bénéfices associés.

4.2.1. Additionnalité réglementaire

Le porteur de projet met en place une pratique qui va au-delà de la réglementation en vigueur, qui l'autoriserait à récolter en bloc son peuplement au début du projet, voir même avant son éligibilité.

Il n'existe pas à ce jour

4.2.2. Additionnalité économique

Ce projet engendre pour le propriétaire un choix économique et technique consistant à étaler dans le temps les revenus attendus de la vente des bois qui aurait dû se faire au début du projet. La temporalité économique de la rentabilité attendue est ainsi modifiée et partiellement différée dans le temps, dans une logique de patience et d'étalement des récoltes pour la filière-bois. Ce faisant, elle représente un manque à gagner immédiat plus important que le scénario de référence, puisqu'il diffère des gains immédiats et certains, pour des gains futurs et en partie incertains.

Pendant la durée du projet, le peuplement sera, comme tous les peuplements, soumis à des risques abiotiques ou biotiques (tempêtes, sécheresses, attaques de ravageurs, maladies) ou de marché (variation du prix du bois, inadéquation future avec les besoins des industriels ou les capacités des scieries en diamètre de coupe) qui peuvent engendrer une dépréciation économique.

Dans le scénario projet, le retour sur investissement sera donc sur du plus long terme, au-delà des termes du projet, mais améliorera par ailleurs le stockage et la séquestration carbone et les co-bénéfices associés.

Sachant qu'aujourd'hui et ce depuis plusieurs années le marché du prix des bois est fortement porteur, il est considéré qu'il n'existe pas d'effet d'aubaine possible à souhaiter maintenir sur pied des peuplements forestiers jugés déjà économiquement matures.

Par ailleurs, la méthode participe ainsi à l'étalement des récoltes et de la mise en marché des bois pour la filière-bois, pour laquelle un « trou de production » potentiel pourrait exister dans les années à venir, notamment du fait de la récolte des plantations résineuses FFN, mais aussi des différentes crises passées (tempêtes, incendies, ravageurs...).

C'est donc une incitation financière à la patience au niveau du propriétaire et à la pérennisation de la récolte pour la filière-bois, ainsi qu'un investissement sur l'amélioration de la valeur des produits (et donc de la chaîne de valeur en cascade) à moyen et long terme. Ce faisant, c'est aussi une incitation à une moindre dégradation des sols et à une meilleure intégration des éléments de fonctionnalité écologique, du mélange d'essences et de l'acceptation sociale des interventions en forêt.

4.2.3. Additionnalité technique

Aujourd'hui, le scénario sylvicole le plus pratiqué dans les peuplements réguliers /équiens et les taillis consiste à récolter le peuplement en procédant à une coupe rase puis au reboisement en plein ou au recépage du taillis. Les itinéraires liés à la présente méthode représentent moins de 10% de la surface forestière en France.

Le maintien sur pied et la recherche du couvert continu d'un peuplement économiquement mature nécessite une certaine technicité et des compétences, qui peuvent freiner le propriétaire. Cette méthode permet ainsi d'ouvrir des voies de financement pour la transition progressive vers la sylviculture mélangée à couvert continu, mais aussi pour la formation vers ce type de sylviculture et des outils de suivi et contrôle plus fins, vers des prises et analyses de mesure « en temps réel » et vers une amélioration de la connaissance générale de fonctionnement des peuplements forestiers.

Par définition, plus il y aura de propriétaires et de forêts engagées dans cette voie, plus cette « demande » fera appel d'air pour structurer une offre de gestionnaires et d'entreprises spécialisées, qui elles-mêmes chercheront et trouveront les solutions technico-économiques pour mettre en œuvre la sylviculture considérée. Offre structurée sur laquelle pourront se greffer nombre d'autres propriétaires forestiers, au-delà des financements liés au carbone. Un cercle vertueux attendu, de manière indirecte, par le financement de ces modalités de transition sylvicole.

4.3. Analyses de la méthode

4.3.1. Analyse légale et des aides publiques existantes.

Le porteur de projet ne saurait ignorer toutes les réglementations existantes concernant la récolte des peuplements forestiers. Il n'existe à ce jour pas d'aide publique dont le porteur de projet pourrait bénéficier à la place du Label bas-carbone sur les mêmes peuplements et pour les mêmes unités de valorisation économique.

Le cas échéant, le porteur de projet devra inventorier les aides existantes et les financements qu'il pourrait percevoir. Le projet sera additionnel si une des conditions ci-dessous est remplie :

- Aucune subvention n'existe (intercommunale, départementale, régionale ou nationale) ;
- Le projet n'entre pas dans les critères des subventions publiques ;
- Le propriétaire s'engage à refuser les aides existantes.

4.3.2. Analyse économique

1.1.1.1 Principe :

L'additionnalité économique du projet se démontre à partir de deux aspects, avec :

- Une phase de transition qui est moins rentable sur la durée du projet que le scénario de référence, puisqu'elle décale des revenus liés à la vente des bois immédiats et certains dans un marché porteur ;
- Une prise de risque au vu du changement climatique et des différents aléas biotiques.

Pour estimer la rentabilité économique de peuplements en futaie régulière, on utilise particulièrement le calcul du taux interne de rentabilité sur une révolution, en fonction notamment des flux financiers qui ont été engendrés durant la révolution. Les investissements initiaux de plantation (travaux de sol, fourniture des plants, installation et entretien) ont un poids important dans le résultat, car ils interviennent dès les premières années et leurs coûts s'actualisent chaque année en fonction notamment des taux définis. Plus cette actualisation est longue (et plus l'inflation est forte, comme actuellement), plus les coûts initiaux associés sont lourds dans la balance globale du système. Les recettes quant à elles interviennent lors des récoltes, avec des bénéfices plus ou moins marqués. En futaie régulière, la première éclaircie est l'opération la moins rentable alors que la coupe finale est l'opération qui permet d'obtenir les recettes les plus importantes. Cette dernière opération intervient lorsque le peuplement a atteint sa maturité économique, mais pourrait survenir plus tard selon la maturité physiologique de ces peuplements. Cependant, dans des scénarios classiques sans aléas de force majeure, et indépendamment du taux d'actualisation, la durée de révolution influence le taux de rentabilité et une révolution courte favorise la plupart du temps une meilleure rentabilité sur une révolution donnée (à qualités de bois et accroissements équivalents).

Le cas du taillis simple est concerné par une seule récolte au cours de la révolution et généralement sans investissements de départ du fait du recépage naturel sur les souches. Bien que modestes, seules des recettes sont comptabilisées dans ce type de sylviculture. Le maintien d'un taillis dans le temps pour le convertir vers un système de mélange futaie-taillis entraîne différentes opérations sylvicoles qui ont cette fois un coût associé (notamment de désignation) et lui aussi un décalage dans la rentabilité attendue de la vente des bois, par définition plus étalée et différée qu'en une seule récolte initiale.

La phase de transition entre le point de départ régulier et l'accompagnement vers l'irrégulier par la sélection des meilleurs arbres dans une ambiance forestière contribue à un bénéfice économique potentiel sur le long terme, mais bien différé pour le propriétaire. La transition demande beaucoup de technicité et amène un décalage temporel des revenus attendus. La rentabilité change un peu de nature, en s'appuyant non seulement sur l'analyse des flux recettes-dépenses mais aussi sur l'évaluation de la valeur du capital restant, qui s'améliore progressivement. En se projetant au-delà de la durée du scénario de projet, on approchera un système irrégulier à l'équilibre : la gestion de peuplement permet de générer des revenus plus fréquents et sur des bois qui, individuellement, sont arrivés à un meilleur potentiel économique en qualité et diamètre. On raisonne « à l'arbre, pris quasiment individuellement » au lieu de raisonner « au peuplement, en moyenne ».

Une fois la transition aboutie, la rentabilité du système irrégulier est évaluée par la notion de « temps de rotation du capital », exprimée en volume ou en valeur monétaire. Celle-ci correspond au temps

nécessaire pour récolter l'équivalent du capital sur pied par une suite d'éclaircies légères et fréquentes. Or, pour atteindre cet équilibre, un temps de rotation du capital dure en moyenne de 20 à 70 ans selon le peuplement de départ. Ce qui légitime, au démarrage de la transition, une « incitation financière à la patience et à l'étalement des récoltes » à laquelle la présente méthode participera fortement.

Par ailleurs, ces dernières années, les différents aléas abiotiques qui ont pu survenir (tempêtes de 1999, 2009, sécheresse de 2003, crise scolyte, incendies...) ont une occurrence de plus en plus forte, et le changement climatique global induit des dépérissements de plus en plus prononcés sur la forêt française sur les stations les plus défavorables ou inadaptées aux essences en place. On constate une augmentation de la mortalité des peuplements de plus de 50% entre les périodes 2005-2013 et 2012-2020 (IGN-IFN 2022). Selon nos critères d'éligibilité, nous considérons que les peuplements de notre méthode sont adaptés à de l'allongement de cycle, par irrégularisation ou système régulier, au vu des diligences effectuées – cependant, il est compréhensif qu'un porteur de projet puisse avoir une aversion au risque et n'aurait pas allongé les cycles de production sans le relai de financement opéré par le projet carbone, qui permet de temporiser la récolte finale qui n'a pas eu lieu.

Ces aléas climatiques et dépérissements ont par ailleurs fait l'objet d'une première méthode Label bas-carbone pour permettre la reconstitution des peuplements dégradés afin de permettre un effet levier dans le reboisement. Le risque est donc de plus en plus accru, avec des pertes économiques proportionnelles à la valeur des arbres et peuplements affectés. En effet, sur la même logique que les politiques assurantielles, plus un peuplement est de qualité, plus le capital sur pied est d'une valeur économique importante et donc *de facto* plus le risque financier est important.

Ces deux facteurs pris en compte permettent d'aboutir à la conclusion que, avec la conjoncture et les risques actuels, avec une phase de transition qui demande de la compétence et une patience financière, le passage à une sylviculture de maintien de peuplements forestiers par couvert continu présente des risques financiers sur la durée du projet.

Pour évaluer et comparer ces différents scénarios, le calcul du BASI-0 (ou critère de Faustmann) est donc souvent utilisé car il permet d'exprimer la rentabilité d'un projet en le modélisant à l'infini. Cependant, dans un contexte de changement climatique, et au vu des risques explicités plus tôt, nous retiendrons une analyse économique de la VAN (valeur actualisée nette) qui est plus adaptée sur la durée du projet dans le contexte actuel.

1.1.1.2 Vérification de l'additionnalité économique :

Pour éviter les effets d'aubaine, il convient d'effectuer une démonstration financière de l'additionnalité du projet, et donc que le projet soit financièrement moins rentable que le scénario de référence.

Cette analyse économique est obligatoire à tout projet.

L'analyse économique suit le même calendrier que les scénarios de référence et de projet. Aussi, il intègre pour le scénario de référence la coupe rase initiale dans les revenus, les frais de reboisement (nettoyage, travaux, travail du sol, achat des plants et mise en place, entretiens...), ainsi que les revenus liés aux éclaircies potentielles et tous frais associés justifiés.

Pour le scénario projet, il intègre l'ensemble des revenus associés aux éclaircies et coupes d'amélioration, jusqu'à la coupe définitive pour le scénario d'allongement de cycle, ainsi que tous les frais associés justifiés.

Equation 1

$$VAN_{référence/projet} = \sum_{n=0}^R \frac{R_n - C_n}{(1+r)^n}$$

Le calcul de la VAN scénario de référence et scénario de projet s'effectue à partir de l'équation 1. Un calculateur ad-hoc a été construit à cet usage.

Equation 2

$$\Delta_{VAN} = VAN_{projet} - VAN_{référence}$$

Avec :

VAN = valeur actualisée nette (en €)

C_n = dépenses liées aux scénario de référence ou projet (en €). Cela peut comprendre : les frais d'exploitation, de débardage, de marquage, frais de plantation, entretien, frais de gestion, assurances...

R_n = recettes liées aux scénario de référence ou projet (en €). Cela comprend les recettes liées à la coupe rase du scénario de référence et les recettes des éclaircies ou coupes d'améliorations.

R = durée du projet (pour la plupart des cas, R = 30 ans)

r = taux d'actualisation, fixé par défaut à 4,5 %.

NB : Les aides publiques auxquelles le porteur de projet serait éventuellement éligible devront être intégrées dans les calculs économiques des VAN.

L'additionnalité économique sera démontrée si $\Delta_{VAN} < 0$ (cf. équation 2).

4.3.3. Analyse du contexte global de développement des sylvicultures à couvert continu

Le développement des sylvicultures mélangées à couvert continu (SMCC) est aujourd'hui avéré partout en Europe (European Commission et Directorate-General for Environment 2023), tant par l'intérêt général que ces approches suscitent dans la société civile et auprès des propriétaires forestiers (9000 personnes ont par exemple suivies, à travers 4 pays d'Europe dont la France, le premier cours en ligne sur la SMCC, ouvert entre octobre et décembre 2023) que par les chiffres de l'augmentation des surfaces de forêts gérées suivant ces principes (en premier lieu les forêts publiques (Pro Silva France 2020b), mais pas seulement).

Le monde scientifique recommande qu'une proportion plus importante des forêts métropolitaines soit gérée selon ces principes (Académie des Sciences 2023), en lien notamment avec les besoins

d'adaptation aux changements climatiques et aux incertitudes qui en découlent, qui tendent à rendre beaucoup plus aléatoires les principes de gestion basés sur une anticipation et des pratiques systématisées. Ces changements amènent au contraire le besoin d'une gestion forestière fine, suivie et contrôlée, basée sur l'observation et l'adaptation « au fil de l'eau », avec des interventions fréquentes et légères. Autant d'ingrédients déjà en place dans la SMCC.

Par ailleurs, des études récentes confirment que les coupes rases ont des impacts négatifs sur nombre de facteurs de production et de fonctionnalité des sols et des écosystèmes forestiers en général (GIP ECOFOR, RMT AFORCE 2023). De ce fait, le développement des stratégies sylvicoles qui permettent de s'en exonérer (en tout cas d'éviter de les planifier en tant que tel dans les itinéraires de gestion) est une plus-value environnementale et sociale qu'il convient d'encourager.

En l'absence de statistiques nationales ou régionales à ce sujet (pas de suivi spécifique des surfaces et/ou DGD établis selon les principes de la SMCC en date de rédaction de la présente méthode), Pro Silva France a mené une enquête en 2020 auprès de ses seuls adhérents professionnels de la gestion forestière. Un plancher de surfaces de forêts gérées suivant les principes de la SMCC à 1,3 millions d'hectares a été établi en 2020 (Pro Silva France 2021), pour un peu plus de 300 adhérents. Ces forêts fournissent chaque année plusieurs millions de m³ de bois aux filières de transformation, séquestrent et stockent plusieurs dizaines de millions de tonnes de carbone et fournissent tous les co-bénéfices connus.

Cette surface de forêts gérées suivant les principes de la SMCC, à hauteur de 1,3 millions d'hectares en 2020, est donc conséquente et, son évolution à travers le temps, démontre l'intérêt de propriétaires ou sylviculteurs. Cependant, cette surface gérée selon les principes de la SMCC représente aujourd'hui moins de 10% de la surface forestière métropolitaine. La mise en place de cette méthode pourrait être un levier important pour transiter vers ces pratiques.

4.3.4. Analyse des barrières techniques

Les barrières techniques, économiques, sociales, liées aux habitudes, sylvicoles ou encore liées aux craintes ou au manque d'information et/ou de compétences techniques de certains opérateurs existent pourtant et rendent le développement des sylvicultures à couvert continu moins accessibles au grand nombre (Pro Silva France 2019; 2020a).

L'ensemble des co-bénéfices et des services environnementaux rendus par ces forêts et cette gestion ne sont par ailleurs pas valorisés à leur juste valeur aujourd'hui, rendant plus difficile et plus limité le parti pris économique et technique de propriétaires qui seraient toutefois prêts à différer une partie des revenus potentiels de la vente de leurs bois, au bénéfice d'un rendement soutenu sur le moyen et long terme. La reconnaissance et la valorisation des services, produits et autres fonctions que ce type de sylviculture permet de garantir en tous lieux et de manière durable dans le temps, sera nécessairement une incitation forte en faveur de ce type de démarches sylvicoles, engagées sur une temporalité et une logique spatiale différentes, tant du point de vue économique que sylvicole.

La présente méthode participe de ce développement en cours, en complément des initiatives et méthodes existantes, dans une logique de complémentarité et d'équité d'accès aux financements pour les propriétaires et gestionnaires souhaitant développer des itinéraires sylvicoles de ce type.

5. Intégrité environnementale

Les projets éligibles dans le cadre de cette méthode nécessitent forcément des prélèvements lors des coupes d'amélioration ou d'irrégularisation. Par conséquent, en l'état et sans pilotage, ces coupes pourraient mener à une perte de biodiversité *in situ*. C'est pourquoi, la méthode veille au respect de critères environnementaux, pour que les projets ne soient pas source de perte de biodiversité (logique de « non-régression écologique »).

Pour prendre en compte cette dimension importante dans les projets, **un diagnostic IBP (indice de biodiversité potentielle) devra être réalisé par un professionnel forestier** formé à l'IBP pour tout projet. Ce **diagnostic de la capacité d'accueil de la biodiversité du peuplement** visera à établir un état initial en début de projet et permettra ainsi de piloter une sylviculture favorisant le maintien ou l'amélioration des critères liés aux peuplements (présence de bois mort, de très gros bois, de dendro-microhabitats...).

Deux diagnostics IBP seront réalisés à mi-projet et en fin de projet pour permettre de vérifier que des critères de conservation de la biodiversité seront bien pris en compte lors des différentes opérations de gestion.

La réalisation de ce diagnostic sur la biodiversité pourra se faire concomitamment au diagnostic d'éligibilité sur les critères dendrométriques (voir 2.2.) de façon à limiter les coûts pour le porteur de projet.

6. Intégration du risque de non-permanence

Conformément au label Bas-Carbone, le projet devra intégrer le risque de non-permanence, pouvant engendrer des émissions de carbone imprévues.

En effet, malgré l'ensemble des mesures prises, un certain nombre de risques sont généraux et difficilement quantifiables ou maîtrisables. Ils comprennent notamment les risques sanitaires (scolytes et autres ravageurs, maladies...), les tempêtes, et une décision de récolte anticipée lors de la durée du projet, liée ou non à ce type catastrophe naturelle.

Pour des raisons évidentes de complexité pour le porteur de projet, le risque de non-permanence n'est pas intégré dans les modèles de croissance de la biomasse, mise à part l'intégration de la mortalité et de son évolution simulée (voir partie calculateur). La non-permanence est prise en compte sous la forme de rabais ou de critère d'éligibilité pour chacun des risques identifiés.

Toutefois, l'encadrement légal et technique de la gestion forestière en France limite plus fortement qu'ailleurs les impacts carbone de tels risques. Conformément à la partie II.C.6 du référentiel du label Bas-Carbone, un rabais forfaitaire de 10 %, correspondant à la fourchette basse de la gamme de 10 à 40 % observée dans les labels internationaux, est systématiquement appliqué pour prendre en compte ces risques en forêt métropolitaine.

Les paragraphes suivants listent les principaux types de risques de non-permanence et les critères permettant de les éviter – au-delà de la comptabilisation *ex-post*.

6.1. Risque de dépérissement/inadéquation à la station

6.1.1. Adéquation des essences à la station

Un des principaux risques concernant le maintien d'un peuplement est qu'il ne soit pas ou plus adapté à la station ou aux conditions climatiques futures. Pour tenir compte de ce risque, le porteur de projet devra fournir une analyse détaillée de l'adéquation entre la ou les essences du projet et la station, sur base de critères pédologiques et climatiques, comme le précise le paragraphe 3.2.1. Cette analyse pourra être réalisée par le propriétaire (s'il en a les compétences) ou par un professionnel forestier (expert forestier, gestionnaire forestier professionnel, ONF...).

6.2. Risques liés à l'incertitude de la coupe rase du scénario de référence

La méthode prévoit de nombreuses précautions pour la définition d'un peuplement éligible à la coupe rase (proportion de surface terrière ayant atteint le terme d'exploitabilité, diamètre minimum réhaussés, enquête auprès des gestionnaires...).

Cependant, il subsiste une incertitude sur le fait que l'itinéraire aurait réellement prévu une coupe rase dans les années à venir. Aussi, afin d'éviter tout effet d'aubaine potentiel, un rabais supplémentaire, non récupérable, est appliqué sur les REE selon la maturité du peuplement à l'entrée dans le projet :

Ce rabais se calcule à partir de la proportion de la surface terrière n'ayant pas atteint le terme d'exploitabilité et est dégressif au fur et à mesure des années jusqu'à être nul à une date donnée en fonction de la maturité initiale du peuplement.

Le rabais se calcule comme suit :

- Rabais n = % de $G_{tot} < TEmini$ / 2
- Rabais années $n+1$ = Rabais(n) – 1%

Exemple :

Si $G(D < TEmini) = 6\%$, on obtient : 3% la 1^{ère} année, 2% la 2^e année, 1% la 3^e année et 0% ensuite.

Si $G(D < TEmini) = 15\%$, on obtient : 7,5% la 1^{ère} année, 6,5% la 2^{ème} [...] et 0% à partir de la 8^{ème} année.

Si $G(D < TEmini) = 20\%$, on obtient : 10% la 1^{ère} année, 9% la 2^{ème} [...] et 0% à partir de la 11^{ème} année.

6.3. Risques liés au maintien du scénario projet

6.3.1. Risques liés au marché

Les peuplements forestiers étant pour la plupart économiquement valorisables dès le début du projet, il est possible, notamment en cas de hausse des prix du bois ou de mutation de propriétaire, que les bois soient volontairement récoltés pour être valorisés par une coupe rase.

Le risque est également important de coupes d'améliorations trop fortes qui compromettraient le renouvellement par régénération naturelle du peuplement ou l'état sanitaire des arbres restants, ce qui serait incompatible avec l'itinéraire projet.

Aussi, pour limiter ce risque, la comptabilisation carbone se fait selon une méthode *ex-post* et seulement en partie, au gré des audits par des mesures régulières des parcelles projets. Le solde de la comptabilisation arrivera seulement en fin de projet.

6.3.2. Risque lié à la technicité du scénario irrégularisation

Afin de garantir un itinéraire irrégulier réaliste, sans forte décapitalisation qui mènerait le peuplement à un capital trop faible en fin de projet et ne permettrait pas de renouveler le peuplement, les taux des prélèvements maximums sont fixés à 30% pour des peuplements résineux et à 40% pour les taillis simples. En effet, l'irrégularisation ne peut se faire sans maintenir un capital minimal garantissant le maintien de l'ambiance forestière et la continuité de la régénération naturelle.

Le capital d'équilibre minimal en fin de projet est également fixé pour les itinéraires « irrégularisation » dans le tableau suivant :

Tableau 5 - Capital minimal d'équilibre cible en fin de projet Irrégularisation (selon les recherches de AFI croisées avec des réseaux européens(ex. programme Askafor), disponibles sur prosilva.fr)

Essences	Capital minimal en fin de projet en Irrégularisation (m ² /ha)
Douglas, sapin, épicéa	35
Pins, mélèze, cèdre	25
Hêtre, châtaignier, robinier	20
Chênes	15

En cas de non atteinte de ces capitaux d'équilibre pour des raisons de sylviculture, hors justification externe, les co-bénéfices associés à l'itinéraire irrégulier ne pourront pas être attribués.

6.3.3. Risque lié à l'engagement dans le projet

Une partie des réductions d'émissions générées sont le bénéfice de l'évitement de la coupe rase et des émissions liées notamment au travail du sol pour la plantation. La méthode prévoit donc d'intégrer à la veille de l'année n+30 la coupe définitive ou la coupe rase le cas échéant, ce qui permet de ne pas surestimer le gain carbone dû au report de coupe.

Pour le scénario irrégularisation, afin d'éviter toute surestimation du bénéfice carbone qui aurait pu survenir à l'année t=31, deux principes sont mis en place :

- **Aucun rabais supplémentaire** n'existe si le propriétaire s'engage à maintenir un système irrégulier à travers **une Obligation Réelle Environnementale (ORE) sur au moins 50 ans**, en dehors de tout aléa exceptionnel, ce qui sécurise donc le risque d'une éventuelle coupe rase

qui aurait pu survenir après les 30 ans du projet car l'état dit « d'équilibre » (cf. § 4.3.2) ne serait pas entièrement atteint, ou,

- **Un rabais supplémentaire de 20%**, non récupérable, est mis en place si jamais le propriétaire ne souhaite pas s'engager à travers une ORE sur au moins 50 ans.

6.4. Risques liés aux aléas exceptionnels

6.4.1. Risque incendie

Un risque d'incendie est à considérer pour tout projet situé :

- dans un département ou un massif forestier considéré à risque par l'article L133-1 ou L 132-1 du Code forestier⁶ ;
- ou dans une commune considérée à risque par un PDPFCI, PRDFCI, atlas incendie ou tout autre document classant le risque d'incendie par commune.

Les départements suivants sont réputés particulièrement exposés au risque incendie au sens de l'article L 133-1 du code forestier :

- | | | |
|-----------------------------|---------------------|--------------------------|
| • Alpes-de-Haute-Provence ; | • Drôme ; | • Lot-et-Garonne ; |
| • Alpes-Maritimes ; | • Gard ; | • Lozère ; |
| • Ardèche ; | • Gironde ; | • Pyrénées-Atlantiques ; |
| • Ariège ; | • Haute-Corse ; | • Pyrénées-Orientales ; |
| • Aude ; | • Hautes-Alpes ; | • Tarn ; |
| • Aveyron ; | • Hautes-Pyrénées ; | • Var ; |
| • Bouches-du-Rhône ; | • Hérault ; | • Vaucluse. |
| • Corse-du-Sud ; | • Landes ; | |
| • Dordogne ; | • Lot ; | |

Certains massifs forestiers au sein de ces départements sont considérés à moindre risque incendie. Il conviendra de vérifier au sein de l'annexe 2 de l'arrêté du 6 février 2024⁷ classant les bois et forêts exposés au risque d'incendie si le massif où se situe le projet est listé.

De plus, des bois et forêts sont classés au titre du L.132-1 du code forestier comme comportant un risque incendie dans des départements n'en comportant pas auparavant. Il conviendra de se rapporter à l'annexe 1 de l'arrêté cité ci-dessus afin de vérifier si le massif forestier où se situe le projet est classifié. Les départements comportant des massifs classés au titre du risque incendie sont :

- | | |
|-----------------------|------------------|
| • Charente ; | • Jura ; |
| • Charente-Maritime ; | • Loir-et-Cher ; |
| • Cher ; | • Loire ; |

⁶ Article L133-1 du Code forestier : « Sont réputés particulièrement exposés au risque d'incendie les bois et forêts situés dans les départements définis par arrêté conjoint des ministres chargés de la forêt, de l'environnement et de la sécurité civile, à l'exclusion de ceux situés dans des massifs forestiers à moindres risques listés par le même arrêté. »

⁷ <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000049111873>

- Eure ;
- Haute-Garonne ;
- Gers ;
- Ille-et-Vilaine ;
- Indre-et-Loire ;
- Isère ;
- Loiret ;
- Morbihan ;
- Savoie ;
- Deux-Sèvres ;
- Tarn-et-Garonne ;
- Vienne.

Attention, cet arrêté (au titre de l'article L.132-1 du code forestier comme du L. 133-1) est susceptible d'évolution afin de prendre en compte l'extension du risque incendie sur le territoire national. Il conviendra de se référer à la version de l'arrêté en vigueur.

Pour chacun des départements concernés, il conviendra de consulter le PDPFCI (plan départemental de protection des forêts contre l'incendie) approuvé par le préfet. Le porteur de projet consultera les cartes départementales ou les atlas pour fixer le niveau dans la liste ci-dessous :

- Le risque est considéré comme négligeable ; aucun rabais temporaire ne sera appliqué sur les réductions d'émissions potentiellement générables ;
- Le risque est considéré comme très faible ou faible ; un rabais temporaire de 5 % sera appliqué sur les réductions d'émissions potentiellement générables ;
- Le risque est considéré comme moyen ; un rabais temporaire de 10 % sera appliqué sur les réductions d'émissions potentiellement générables ;
- Le risque est considéré comme fort ou très fort ; un rabais temporaire de 15 % sera appliqué sur les réductions d'émissions potentiellement générables.

La comptabilisation des réductions d'émissions générables se faisant en ex-post, les rabais incendie seront levés à la fin du projet lors de l'audit final.

D'autres départements non cités par l'article L133-1 du Code forestier (pour lesquels le risque d'incendie est mineur) ont fait approuver par le préfet un PDPFCI ou un PRDFCI. Ces plans seront consultés et les mêmes rabais que ceux précités seront appliqués selon le classement des communes.

D'autres départements non cités par l'article L133-1 du Code forestier (pour lesquels le risque d'incendie est mineur) ont fait appro

ver par le préfet un PDPFCI (et autres documents). Ces plans seront consultés et les mêmes rabais que ceux précités seront appliqués selon le classement des communes.

En l'absence d'un classement clair du risque comme étant « négligeable » sur la commune du projet dans le PDPFCI (et autres documents), celui-ci sera considéré comme nul et sans rabais.

6.4.2. Risque tempête

Le scénario de projet est également soumis au risque tempête, cependant, l'itinéraire projet encadre les types de peuplements éligibles (peuplements gérés et non déséquilibrés) et les prélèvements associés aux coupes d'éclaircies (pas de coupes trop fortes qui déstabiliseraient les peuplements). De ce fait, et sachant que la méthode comptabilise les réductions d'émission en ex-post, il est admis que le risque tempête est faible et compris dans le risque de non-permanence avec rabais de 10% obligatoire.

6.5. Synthèse des risques

Le tableau suivant récapitule les risques pris en compte dans la méthode pour l'estimation carbone, qui seront ensuite vérifiés par la comptabilisation ex-post, ainsi que leur prise en compte :

Tableau 6 - Synthèse des risques pris en compte dans la méthode

Type de risque	Risque associé	Prise en compte
Non-permanence générique	Mesure de prudence sur les REE estimées face aux différents aléas	Rabais de 10% obligatoire
Dépérissement ou inadéquation à la station	Adéquation des essences à la station	Diagnostic préalable pour garantir l'éligibilité
Dépérissement ou inadéquation à la station	Cas des essences vulnérables	Restriction sur les essences vulnérables et diagnostic DEPERIS
Incertitude du scénario de référence	Mise en œuvre de la coupe rase du scénario de référence	Rabais dégressif en fonction de l'avancée de la maturité du peuplement
Maintien du scénario projet	Evolution du prix du marché	Comptabilisation intermédiaire <i>ex-post</i> des REE
	Technicité du scénario projet irrégularisation	Condition de capital minimal à atteindre en fin de cycle
	Pérennité du projet irrégularisation	Rabais de 20% ou exempté si Obligation Réelle Environnementale
Aléas exceptionnels	Incendie	Rabais de 5 à 15 % en fonction des PDPFCI
	Tempête	Encadré par les pratiques et intégré au rabais de 10% obligatoire

7. Calcul du stockage carbone additionnel générables

Conformément au label Bas-Carbone, le projet bas carbone va déterminer les niveaux et délivrer des « réductions d'émissions (RE) », terme consacré pour désigner les tonnes de carbone additionnelles prévues ou mesurées.

Leur définition est précisée dans le label Bas-Carbone. La communication du financeur quant au type de « réductions d'émissions » valorisées fait l'objet d'un encadrement par le label Bas-Carbone.

L'annexe technique 1 précise l'ensemble des paramètres du stockage de carbone additionnel généré.

Le tableau suivant, extrait de la synthèse opérationnelle de l'annexe, permet d'obtenir un aperçu :

Compartiment			Stock initial	Gain annuel	Pertes
Biomasse arbres	vivante	des	Emerge + Cairns avec les mesures initiales	Emerge + Cairns avec : Htot = f(âge) selon essence/Greco %Accr.G = f(âge) selon essence	Mortalité (cfr ligne 2) Récoltes Tige, Branches, Bois mort (§ 4)
Bois mort			Estimé avec les données du porteur de projet	Mortalité en % du volume vivant : t=1 : 0,5% t=2 à t=30 : Chaque année × 1,02 Moins le volume récolté (selon %) Branches coupées et volume tige mort récoltées à chaque éclaircie	Durée moyennes de vie voir § 3.4 Moyenne des essences par compartiment en cas de mélange
Sous-étage			Selon mesures du porteur de projet (5 à 20 10 tCO ₂ /ha)	Gain net moyen = 0,33 tCO ₂ /ha/an (effet de la mise en lumière)	100% du stock après coupe rase (Référence), puis reconstitution linéaire pour arriver à 10 tCO ₂ /ha à 30 ans
Sol			Résineux = 330 tCO ₂ /ha Feuillus = 300 tCO ₂ /ha	Sous couvert = 1,28 tCO ₂ /ha Après coupe rase = hausse linéaire de 0,05 à 1,28 tCO ₂ /ha en 30 ans	Perte de 15% du stock après coupe rase (Référence), puis restockage jusqu'à la valeur avant coupe
Produits			Null.	<u>Volume tige récolté</u> x % de chaque produit x Rendement des produits	Perte annuelle = Stock / DV Avec DV selon le produit bois.

8. Quantification carbone des itinéraires

Le détail de la méthode de comptabilisation carbone des itinéraires est précisé dans l'annexe 1. Les quantifications carbone, utilisées pour obtenir une estimation avant la vérification *ex-post*, sont produits à partir d'un calculateur accessible en ligne pour les porteurs de projets et sont effectués à partir d'un logiciel de traitement statistique R sous Shiny.

8.1. Modélisation de l'évolution du carbone dans le scénario de référence

La gestion des peuplements réguliers, notamment issus de la plantation du FFN, entraîne une coupe rase à l'année $n=1$, puis un reboisement à l'année $n+2$ voir à l'année $n+3$ ou $n+4$ pour le temps du vide sanitaire contre l'hylobe. Cette pratique n'étant pas généralisée et, par mesure de prudence, nous considérerons que le reboisement a lieu dès l'année $n+2$. La mise sur le marché des produits bois permet ainsi de séquestrer du carbone selon la durée de vie des produits.

Pour chaque essence, un diamètre de récolte a été déterminé, sur la base d'une analyse des SRGS, DRA et SRA et adaptée de façon réaliste grâce à une enquête transmise à une centaine de gestionnaires forestiers, experts forestiers, membres de l'ONF, du CNPF...

La modélisation de l'évolution du carbone dans le scénario de référence se fera donc à l'année 0 précédant celle de la coupe rase.

Elle se fera uniquement à partir du calculateur fourni, qui intègre des données relatives à la production des peuplements, en fonction des critères de fertilité renseignés pour le scénario projet. Le porteur de projet ne pourra pas choisir l'essence de reboisement, qui sera considérée identique à celle du scénario de référence pour comptabiliser une essence au moins aussi productive afin d'éviter les risques de surestimation de l'additionnalité.

8.2. Modélisation de l'évolution du carbone dans l'itinéraire projet

Pour le scénario de projet, la modélisation débutera également à l'année $n=0$ et prendra en compte l'ensemble de la production et des coupes d'améliorations prévues pendant la durée du projet.

Des données dendrométriques permettront au porteur de projet de se positionner, à partir d'un calculateur fourni, sur un itinéraire sylvicole permettant de modéliser la croissance des peuplements pendant la durée de projet.

La définition, par le calculateur, de la classe de fertilité à partir des données dendrométriques collectées, permet de prendre en compte la modélisation carbone adéquate. Elle se fait par le rapprochement, par le calculateur, des données stationnelles et de hauteur dominante fournies par le professionnel forestier, des courbes IGN de l'essence dans la GRECO, établies à partir des données IGN brutes récentes (voir Annexe 2).

8.3. Calculateur carbone

Le calculateur carbone « PRM » (Production-Récolte-Mortalité) s'insère dans la Méthode selon le diagramme ci-dessous :

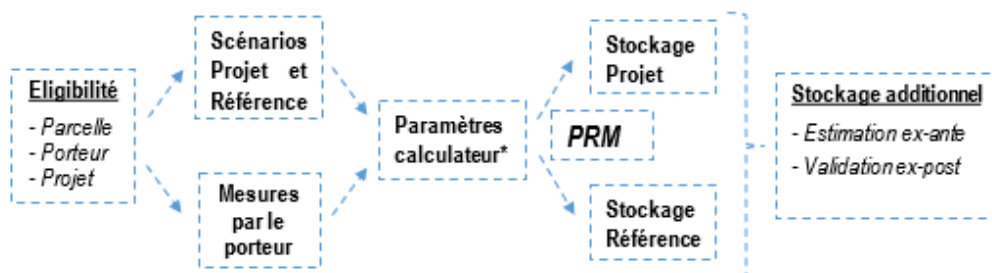


Figure 1- Diagramme de l'intégration du calculateur "PRM" dans la méthode LBC

		Variables (fixes ou évolutives sur 30 ans)	Unité	Es	St	Sy	Fil
STOCKAGE	P	Production brute du peuplement considéré	m ³ / ha / an	X	X	X	
	M	Mortalité naturelle annuelle du peuplement	% du volume total sur pied	X	X	X	
	Dm	Durée de vie moyenne du bois mort des essences	Nombre d'années (selon bois)	X	X	X	
	Ss	Stockage annuel de carbone dans le sous-étage	t-eqCO ₂ / ha / an	X	X	X	
	S	Stockage annuel de carbone dans le sol	t-eqCO ₂ / ha / an	X	X	X	
SEQUESTRATION	Rt	Récolte appliquée aux troncs	% du volume tige (tronc)			X	
	Rbr	Récolte appliquée aux branches ⁸	% du volume branches			X	

⁸ On suppose nulle la récolte appliquée aux souches.

	Rm	Récolte bois mort appliquée au peuplement	% du volume mort annuellement			X	
	%BO	Part de bois durable potentiel dans la tige	% du volume tige total	X		X	X
	Vbo	Taux de valorisation potentiel en produits durables	% du volume de tige (tronc) prélevé			X	X
	Tp	Rendement transformation du BO récolté	BO récolté / BO final (%)				X
	Dp	Durées de vie moyenne des bois récoltés	Nombre d'années (selon produit)				X
	ID	Infradensité du bois	t.MS / m ³	X			
	TC	Taux de carbone du bois (matière sèche)	t.C / t.MS (ou t-eqCO ₂ / ha)	X			
SUBSTIT.	CSe	Coefficient de substitution énergie	t-eqCO ₂ / m ³				X
	CSm	Coefficient de substitution matériau	t-eqCO ₂ / m ³				X
	TS	Taux de substitution effectif	% effectivement remplacé par le bois				X

La recherche des paramètres et de leur cadrage représente un travail important. Le tableau ci-dessous les résume, avec les groupes de facteurs dont ils dépendent : essences du peuplement (Es), station (St), scénario sylvicole étudié (Sy), filière-bois dans lequel s'effectue la récolte (Fil).

Tableau 7 - Paramètres pris en compte par le calculateur "PRM"

Le calculateur doit ainsi intégrer des paramètres de trois types :

- imposés par la méthode selon la situation de départ et l'itinéraire choisi (fixes ou variables sur 30 ans), par exemple production brute du peuplement ;
- à fixer par l'utilisateur selon des règles définies par la méthode, par exemple années et taux de prélèvement ;
- mesurés avant-projet par l'utilisateur dans chaque type de peuplement des parcelles étudiées, par exemple composition en essences, surface terrière et hauteurs.

Le calculateur est codé sous le **logiciel de traitement de donnée R et plus particulièrement le package Shiny** qui permet de mettre en place une interface utilisateur, à partir du modèle Excel

« PRM » développé par adaptation d'une base de simulation nationale (Du Bus de Warnaffe et Angerand 2020) et avec les choix méthodologiques présentés dans cette Annexe. Le porteur de projet devra utiliser l'interface utilisateur développée grâce à l'extension Shiny, qui sera déposée en ligne pour la rendre accessible et garantir à ses auteurs que la Méthode est bien utilisée.

8.4. Données d'entrée du calculateur

Les données précisées dans le tableau ci-après seront à intégrer au calculateur pour alimenter les différents paramètres. Un manuel d'utilisation du calculateur est disponible dans les informations hébergées sur l'interface en ligne du calculateur.

Mesures et données du porteur de projet	Choix cadré du porteur de projet	Choisis par le Modèle
<u>Pour l'Eligibilité et l'estimation initiale :</u> GRECO Surfaces terrières en bois vivant (D>17,5cm sauf Méditerranée 12,5) : G total par essence G de l'essence principale dépassant le TE.mini en diamètre - G francs-pieds en sous-Méthode Taillis Hauteur dominante de l'essence principale % classes Deperis Age (à minima fourchette de 20 ans) Volume initial de bois mort Produits sur pied : qualités par produits potentiels, initiales et à chaque éclaircie prévue et répartition attendue dans les différents produits bois potentiels Eclaircies prévues par le projet (année + %Tige-Branches-BoisMort) <u>En plus pour suivi/Audit :</u> Surfaces terrières et hauteurs ci-dessus G par classe de D (par essence) Indicateurs de co-bénéfices Régénération (% de surface, hauteur) Coupes réalisées (année et m³ par produit) Volume et état du bois mort	Classe de fertilité de l'essence (Ho/âge) Scénario de référence Itinéraire du scénario-projet <u>Facteurs de vigilance*</u> : alerte au porteur de projet sur le niveau de risque en fonction de sa zone : - Risque incendie (guide du niveau) - Exposition aux vents (guide du niveau) - Densité de cervidés (guide du niveau) <i>* A ce stade non intégrés dans le calculateur (définir un guide du niveau et préciser en entrée la zone géographique du projet.</i>	Itinéraire du scénario de référence Modèles de croissance Hypothèses de mortalité Demi-vies du bois mort Stockage dans le sol et le sous-étage Taux de BO dans la tige, taux de valorisation du BO, rendements de transformation et demi-vie Infradensité et taux de carbone du bois + Paramètres de substitution (coefficients, taux de remplacement effectif)

9. Calendrier, vérifications et attribution des RE

9.1. Calendrier de mise en œuvre et de suivi de projet

Le projet sera mis en œuvre selon les étapes principales représentées dans la figure suivante.

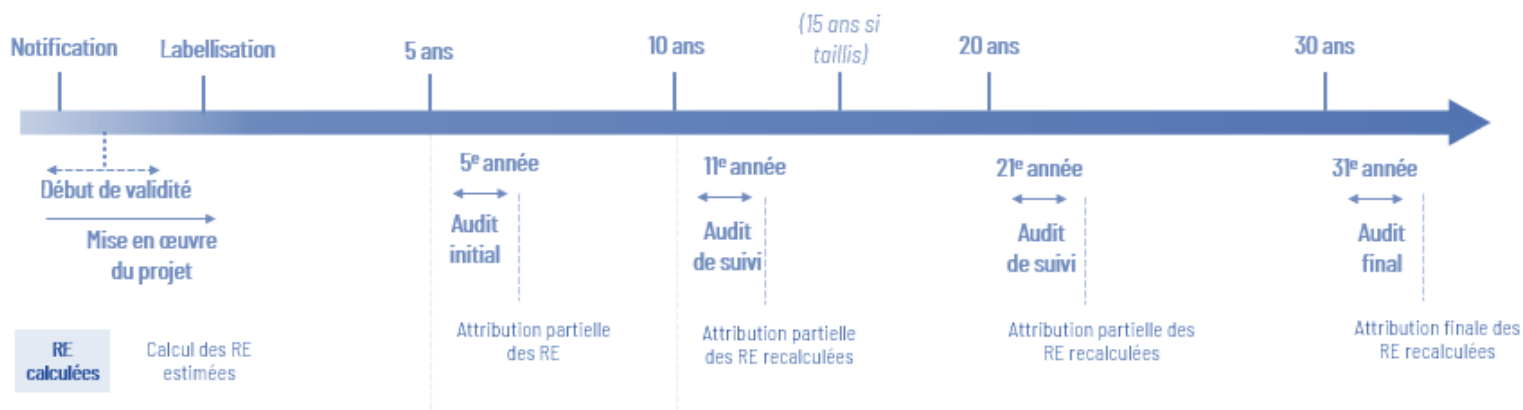


Figure 2 : Frise chronologique de projet

Les étapes importantes du projet s'échelonnent de la manière suivante :

1. Préparation du projet et du dossier initial complet, basé lui-même sur un diagnostic complet et la fourniture des pièces obligatoires
2. Dépôt de la notification de projet sur [Demarche-Simplifiees.fr](https://demarche-simplifiees.fr) ;
3. Mise en œuvre du projet à partir de la date de notification ;
4. Montage et dépôt du dossier de labellisation au plus tard 1 an après la date de première notification (peut-être déposé simultanément à la notification), indiquant la date de début de validité du projet.
5. Lors de la première année, le dossier est instruit et validé par la DREAL sur la base du diagnostic terrain du porteur de projet et des éléments documentaires transmis ;
6. A 5 ans, un auditeur tiers vérifie l'ensemble des données documentaire et de terrain, à réaliser dans le courant de la 6^{ème} année de **mise en œuvre du projet** ;
7. A 10 ans et 20 ans (ou seulement 15 pour le taillis) : le porteur de projet transmet l'ensemble des documents, à la suite d'une vérification de terrain, pour qu'un auditeur procède à un audit documentaire simplifié, dans le courant de l'année suivante de la **mise en œuvre du projet** ;
8. A 30 ans (ou 20 ans pour un projet à durée réduite), un auditeur tiers vérifie l'ensemble des données documentaire et de terrain lors d'un audit final.

A noter : A chaque stade d'audit, l'attribution des réductions d'émissions est toujours définie sur la base des estimations initiales du calculateur avec les données terrain du porteur de projet. Au fil du temps, si l'itinéraire projet constaté diffère notablement de celui prévu dans la trajectoire (>10% de différence des REE), une réévaluation des REE sera exigée par l'Autorité, afin de recalibrer le modèle sur la réalité constatée. En deçà de ce seuil, les attributions partielles des réductions d'émissions permettront d'éviter les adaptations à la marge. Se référer à la partie §9.2 pour les détails concernant l'audit.

A chaque stade de reconnaissance des réductions d'émission, les éventuels rabais sont levés sur la période effective et reconnue, en proportion des années déjà écoulées.

Chacun des audits se déroule suivant les parties **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** à 0 du texte de la méthode. La vérification et reconnaissance des réductions d'émissions constatées par l'autorité s'effectue après chaque audit selon les modalités spécifiées en partie 9.6.

Tableau 8 - Exemple de calendrier de projet

Exemple de calendrier de projet	
Notification	10 janvier 2025
Début de validité du projet définie par le porteur de projet	11 janvier 2025
Dépôt du projet de labellisation	13 mai 2025 (limite 10 janvier 2026)
Validation de la labellisation	4 août 2025
Diagnostic et audit initial complet à N+5	Du 12 janvier 2031 au 20 novembre 2032
Diagnostic et audit simplifiés de suivi à N+10 (ou 15)	Du 12 janvier 2036 au 20 novembre 2037
Diagnostic et audit simplifiés de suivi à N+20 (absent en taillis)	Du 12 janvier 2046 au 20 novembre 2047
Diagnostic et audit final complet à N+30 (ou N+20 le cas échéant)	Du 12 janvier 2056 au 20 novembre 2057
Fin de validité du projet	12 janvier 2057 (ou 2047 le cas échéant)

9.2. Processus d'instruction et d'audit

9.2.1. Instruction auprès des DREAL

L'instruction du dossier auprès des DREAL permet de vérifier la cohérence du projet au vu des différentes pièces transmises. Il s'agit d'une revue documentaire qui vérifie l'éligibilité du projet et permettra de valider le dossier, qui sera ensuite audité à plusieurs reprises pour attribuer les réductions d'émissions.

Avant validation, les services de la DREAL peuvent formuler des commentaires ou demandes de modifications afin que le projet soit aligné avec les différents points présentés dans la méthode.

Les délais d'instruction auprès des DREAL suivent les dispositions réglementaires cadrant le Label bas carbone.

9.2.2. Audit initial (N+5)

Le premier audit à N+5 est un audit documentaire et de terrain effectué par un tiers. Il vérifie que le porteur de projet a bien effectué les démarches nécessaires auprès de l'administration pour la mise en place du scénario de projet et permet d'attribuer une partie des réductions d'émission estimées si l'itinéraire projet est bien réalisé (absence de coupe rase ou de trop forts prélèvements).

Le porteur de projet transmettra auprès de l'auditeur les éléments suivants, prouvant le bon déroulé du projet :

- Dossier complet déposé à la DREAL lors de l'instruction ;
- Factures des différentes ventes de bois, précisant le volume et la qualité des bois prélevés s'il y a lieu ;

L'audit consistera uniquement à vérifier l'éligibilité du peuplement et donc les données dendrométriques, la fertilité estimée, les co-bénéfices et la trajectoire mise en place pour le projet carbone (notamment pérennité du peuplement).

9.2.3. Audits simplifiés de suivi (N+10 et N+20 ou N+15 pour le taillis)

Les audits de suivi, à N+10 et N+15 ou N+20 sont des audits documentaires vérifiés à partir des éléments transmis par le porteur de projet. Ils vérifient que le projet est maintenu et permet d'attribuer une partie des réductions d'émissions.

Le porteur de projet transmettra auprès de l'auditeur les éléments suivants, prouvant le bon déroulé du projet :

- Photographies *in-situ* de moins d'un an ;
- Orthophotographie récente ;
- Factures des différentes ventes de bois, précisant le volume et la qualité des bois prélevés ;
- Données d'inventaire retranscrites dans le calculateur carbone et permettant de recalculer les réductions d'émission le cas échéant, réalisées aux mêmes points géographiques que les mesures initiales au plus tard à l'année n-1 de l'audit ;
- Suivi de l'IBP

Sur cette base documentaire, l'auditeur vérifiera la trajectoire du projet.

9.2.4. Audits final (N+30 ou 20 le cas échéant)

L'audit final à N+30 (ou 20) est un audit documentaire et de terrain effectué par un tiers. Il permettra de vérifier le maintien du projet dans le temps et de clôturer le projet. Il se base sur un audit documentaire, à partir de l'ensemble des éléments transmis par le porteur de projet (identiques aux éléments apportés pour les audits de suivi), et de terrain, pour vérifier la transition effectuée sur le peuplement (trajectoire de l'itinéraire, volume sur pied, présence de régénération...). Les réductions d'émissions effectivement réalisées et vérifiées pourront ainsi être attribuées, en levant les rabais temporaires.

9.3. Vérification documentaire par un auditeur

La vérification documentaire est obligatoire pour tous les projets et est effectuée sur l'ensemble des projets individuels dans un projet collectif. Elle est réalisée par un **auditeur compétent et indépendant à chaque échéance d'audit** précisée en 9.1, conformément au référentiel du Label bas-carbone et sur demande du porteur de projet.

La liste des auditeurs est fournie en 9.5. Le coût de la vérification documentaire et de l'audit terrain est à la charge du porteur de projet. Cette vérification peut être réalisée simultanément et par le même auditeur que la vérification de terrain.

Lors des audits, l'auditeur effectue la vérification des éléments documentaires dans le seul but de vérifier que le projet est toujours en cours de réalisation et suit une trajectoire similaire à ce qui avait été prévu. Le contrôle des données permet de valider les réductions d'émissions estimées pour chaque échéance.

Les réductions d'émissions estimées seront révisées à chaque échéance par l'utilisation du calculateur à partir des données de base du diagnostic simplifié et permettront de recalculer / actualiser la trajectoire sylvicole et carbone.

L'auditeur effectue la vérification de l'ensemble des éléments cités au 9.2. Pour ce faire, il se basera sur l'ensemble des documents transmis lors du dépôt de dossier et de l'audit.

L'auditeur pourra également demander que des procédures de suivis complémentaires ou des sources complémentaires soient apportées en cas de doutes avérés sur un point particulier. L'auditeur pourra demander la réévaluation des données en cours de projet afin d'abaisser ou d'augmenter les réductions d'émissions estimées en cas d'écart constaté supérieur à 20% des REE par rapport à la trajectoire définie lors de l'instruction. En deçà de ce seuil, l'écart sera estimé compensé par l'attribution des réductions d'émissions à la fin du projet.

9.4. Rapport de vérification

L'auditeur rédige un rapport de vérification dans les deux cas de vérification tel que prévu au point IV.A.4. du référentiel du label bas-carbone. A son rapport, il joint la feuille du tableur prévue à cet effet permettant le recalcul des réductions d'émissions estimées suivant les **données du rapport de suivi vérifiées par l'auditeur** ainsi que celles qui pourront être affectées au projet à la date d'audit.

Les RE générables à 30 ans recalculées à chaque audit peuvent être inférieures ou supérieures aux stocks estimés au dépôt de labellisation ou à l'audit précédent. Ceci permettant d'assurer, à la fois une permanence et une attribution des réduction d'émissions au plus proche de la réalité, que celle-ci induise une hausse ou une baisse des estimatifs.

9.5. Liste des auditeurs

L'auditeur effectuant les vérifications devra répondre aux exigences détaillées dans la partie IV.A.2. du référentiel du Label bas-carbone. Peut-être auditeur, tout organisme certificateur ou professionnel qui répond à la fois, aux conditions de compétence et d'indépendance par rapport au porteur de projet.

L'auditeur répond aux conditions de compétence au travers du respect des critères suivants :

- Expertise technique : l'auditeur devra démontrer, en s'appuyant sur des certificats, des diplômes, ou d'expériences reconnues, qu'il possède des compétences techniques et/ou scientifiques en gestion forestière. Les statuts d'expert forestier, de gestionnaire forestier professionnel ou tout diplôme en gestion forestière de niveau 5 ou plus est considéré suffisant. L'auditeur devra également pouvoir juger des co-bénéfices et des pièces cartographiques, pour lesquels il n'est pas demandé de justifier sa compétence compte tenu des domaines très diversifiés ;
- Expertise réglementaire : bonne connaissance du contexte réglementaire et du Label bas-carbone ;

L'auditeur répond également aux conditions d'indépendance telles que prévues par le référentiel.

En outre :

- « L'auditeur est indépendant du porteur de projet et du mandataire et il effectue les vérifications avec impartialité. A cet effet, l'auditeur met en place une organisation permettant de garantir son indépendance et son impartialité, et d'éviter notamment les situations de conflit d'intérêts.
- Un auditeur ne peut pas intervenir sur un projet en cas de relations contractuelles avec le porteur du projet ou avec le mandataire ne résultant pas du contrat conclu en vue de la vérification ou de contrats organisant d'autres vérifications indépendantes du label Bas-Carbone. L'audit effectué au titre du label Bas-Carbone peut être mutualisé avec ces autres contrôles, audits ou vérifications. »

9.6. Attribution des réductions d'émission par l'autorité

Le rapport de vérification est remis par l'auditeur au porteur de projet. Ce dernier adresse ensuite à l'Autorité compétente une demande de vérification de la quantité des RE à attribuer selon le stade du projet selon les conditions prévues dans le tableau ci-après. Ces dernières ne peuvent être supérieures aux RE vérifiées par l'auditeur et mentionnées dans son rapport.

Le porteur joint à sa demande de vérification :

- Le rapport de vérification de l'auditeur ainsi que les éléments utiles pour justifier que l'auditeur choisi est indépendant et compétent (cf. 0) ;
- Le nom des bénéficiaires des réductions, s'ils sont déjà connus.

Ces RE vérifiées par l'Autorité sont inscrites dans le registre de suivi des RE du projet de telle manière qu'ils représentent une part des RE générables à 30 ans après application des rabais.

Tableau 9 - Tableau d'attribution des REE en fonction des différents scénarios de la méthode

Stade du projet	Audits	RE vérifiées et attribuées par l'Autorité RE _V (N) Cas de l'irrégulier	RE vérifiées et attribuées par l'Autorité RE _V (N) Cas de l'allongement de cycle	RE vérifiées et attribuées par l'Autorité RE _V (N) Cas du taillis
Labellisation	Instruction du dossier par la DREAL	/	/	/
N+5	Audit initial (documentaire + terrain)	RE _{ATTRIBUEES} (5) = 35% REE – Rabais temp.	RE _{ATTRIBUEES} (5) = 30% REE – Rabais temp.	RE _{ATTRIBUEES} (5) = 33% REE – Rabais temp.
N+10 (Ou n+15 taillis)	Audit de suivi (documentaire sur la base de relevés terrain)	RE _{ATTRIBUEES} (10) = 30% REE – Rabais temp.	RE _{ATTRIBUEES} (10) = 20% REE – Rabais temp.	RE _{ATTRIBUEES} (15) = 33% REE – Rabais temp.
N+20	Audit de suivi (documentaire sur la base de relevés terrain)	RE _{ATTRIBUEES} (20) = 20% REE – Rabais temp.	RE _{ATTRIBUEES} (20) = 20% REE – Rabais temp.	
N+30	Audit final (documentaire + terrain)	RE _{ATTRIBUEES} (30) = 15% REE + Σ Rabais temp.	RE _{ATTRIBUEES} (30) = 30% REE + Σ Rabais temp.	RE _{ATTRIBUEES} (30) = 33% REE + Σ Rabais temp.

10. Co-bénéfices

Conformément au référentiel du label Bas-Carbone, la Méthode doit fournir une « grille d'évaluation des impacts et des co-bénéfices, socio-économiques et environnementaux, notamment sur la biodiversité » (partie III.B) et définir « des indicateurs simples pour démontrer que les éventuels impacts environnementaux, sociaux ou économiques sont maîtrisés » (partie III.F).

Les porteurs de projet devront se reporter à la grille d'analyse des co-bénéfices présente dans le tableau ci-après. Les co-bénéfices répertorient 5 thématiques qui se reportent à la gestion multifonctionnelle des forêts, à savoir : socio-économiques, préservation des sols, biodiversité, eau et co-bénéfices sociaux. Seule la thématique liée à l'eau pourra être exclue du projet en cas d'absence de milieux aquatiques.

Le calcul des points accordés au co-bénéfices se fera à l'échelle de chaque thématique et permettra de retranscrire un taux d'atteinte de co-bénéfice à la thématique. Pour chaque thématique de co-bénéfice, le porteur de projet pourra proposer des co-bénéfices à l'Administration, qui jugera de la pertinence de ceux-ci. Ces co-bénéfices additionnels sont limités à deux par thématique et permettront l'attribution d'un point supplémentaire. La validité de ces co-bénéfices additionnels seront lors de l'audit à n+5.

Ces co-bénéfices seront suivis et vérifiés, tel qu'indiqué par la partie III.F. du référentiel : « *les indicateurs sont communiqués à l'Autorité dans le rapport de suivi et font l'objet de vérifications par un Auditeur à l'occasion des vérifications de réductions d'émissions* ». Par conséquent, le Porteur de projet devra pouvoir apporter la preuve de la bonne réalisation de chaque co-bénéfice, afin que celui-ci puisse être vérifié par l'Auditeur qui réalisera la vérification (partie 10).

Tableau 10 – Liste et attribution des points des co-bénéfices

Type de co-bénéfice	Intitulé	Critère d'évaluation	Valeur
Socio-économiques	Création de plus-value économique territoriale	La majorité des entreprises de travaux forestiers (ETF) retenues sont situées dans un rayon de 50 km	+5
Socio-économiques	Intégration par Création de plus-value économique territoriale	La majorité des entreprises de travaux forestiers (ETF) retenues sont situées dans un rayon entre 50 et 100 km	+2
Socio-économiques	Intégration par l'emploi	Une partie des travaux sera réalisée par des entreprises de réinsertion professionnelle ou d'aide à l'emploi de personnes en situation de handicap	+5
Socio-économiques	Valorisation locale des bois récoltés	Les bois récoltés ou vidangés sont valorisés par une entreprise de 1ère transformation située dans un rayon de 50 km du chantier d'exploitation	+5
Socio-économiques	Certification forestière	Adhésion à une certification de gestion forestière durable (PEFC ou FSC)	+5
Socio-économiques	Assurance forestière	Le propriétaire a souscrit une assurance forestière pour les risques d'incendie et de tempête qui couvre une partie des frais de reboisement	+5
Socio-économiques	Gestion forestière durable	Mandat de gestion auprès d'un professionnel de la filière forestière (Expert forestier, gestionnaire forestier professionnel, ONF)	+5
Préservation des sols	Exploitation à moindre impact	Mise en place de cloisonnements d'exploitation ou cheminement privilégiés	+5
Préservation des sols	Renouvellement des peuplements	Par irrégularisation des peuplements	+5
Préservation des sols	Renouvellement des peuplements	Par régénération naturelle en plein	+3
Préservation des sols	Partage des bonnes pratiques	Les contrats intègrent des clauses d'exploitation et de débardage par temps sec	+3
Préservation des sols	Maintien de la fertilité des sols	Extraction des menus bois jusqu'à 7 cm fin bout	+5
Préservation des sols	Maintien de la fertilité des sols	Extraction des menus bois jusqu'à 4 cm fin bout	+3
Biodiversité	Préservation de la biodiversité pré-existante	Maintien des accrus et de la diversité inter-spécifique	+2
Biodiversité	Préservation de la biodiversité pré-existante	Identification d'au moins 5 arbres vivants habitat / ha	+5
Biodiversité	Préservation de la biodiversité pré-existante	Identification d'au moins 2 arbres vivants habitat / ha	+2
Biodiversité	Préservation de la biodiversité pré-existante	Identification d'au moins 3 arbres morts sur pied ou au sol / ha	+5
Biodiversité	Préservation de la biodiversité pré-existante	Identification d'au moins 1 arbre mort sur pied ou au sol / ha	+2
Biodiversité	Prise en compte lors des exploitations	Identification des éléments de biodiversité sur le terrain et par cartographie	+5
Eau	Prise en compte de milieux aquatiques lors des exploitations	Identification des milieux aquatiques par cartographie et dans les consignes d'exploitation	+3
Eau	Ripisylve	Création ou restauration de ripisylve <i>ex-nihilo</i>	+3
Eau	Ripisylve	Maintien d'une ripisylve feuillue existante	+3
Sociétaux	Respect du paysage par le maintien d'un couvert continu	Par irrégularisation des peuplements	+5
Sociétaux	Respect du paysage par le maintien d'un couvert continu	Par régénération naturelle en plein	+3
Sociétaux	Impact du projet sur le paysage local	La surface projet est supérieure à 20 ha	+5
Sociétaux	Impact du projet sur le paysage local	La surface projet est supérieure à 10 ha	+3
Sociétaux	Impact du projet sur le paysage local	La surface projet est supérieure à 5 ha	+1
Sociétaux	Projet de partenariats	Mise en place de partenariats auprès d'associations pour l'environnement, la recherche ou à visée récréative sur le massif concerné par le projet	+5

11. Références bibliographiques

- Académie des Sciences. 2023. « Les forêts françaises face au changement climatique ».
- Brunori, Antonio Maria Enrico, Paolo Sdringola, Francesca Dini, Luana Ilarioni, Luigi Nasini, Luca Regni, Primo Proietti, Stefania Proietti, Angelo Vitone, et Francesco Pelleri. 2017. « Carbon balance and Life Cycle Assessment in an oak plantation for mined area reclamation ». *Journal of Cleaner Production* 144 (février): 69-78. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.116>.
- Du Bus de Warnaffe, G., et S. Angerand. 2020. « Gestion forestière et changement climatique, une autre approche de la stratégie nationale d'atténuation. » Rapport d'étude des ONG Fern et Canopée.
- European Commission et Directorate-General for Environment. 2023. *Guidelines on closer-to-nature forest management*. Publications Office of the European Union. <https://doi.org/10.2779/731018>.
- GIP ECOFOR, RMT AFORCE, G. 2023. « Expertise collective CRREF “Coupes Rases et REnouvellement des peuplements Forestiers en contexte de changement climatique” ».
- González-García, S., V. Bonnesoeur, A. Pizzi, G. Feijoo, et M.T. Moreira. 2014. « Comparing environmental impacts of different forest management scenarios for maritime pine biomass production in France ». *Journal of Cleaner Production* 64 (février): 356-67. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.07.040>.
- González-García, Sara, Vivien Bonnesoeur, Antonio Pizzi, Gumersindo Feijoo, et María Teresa Moreira. 2013. « The influence of forest management systems on the environmental impacts for Douglas-fir production in France ». *Science of The Total Environment* 461-462 (septembre): 681-92. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.05.069>.
- González-García, Sara, María Teresa Moreira, Ana Cláudia Dias, et Blas Mola-Yudego. 2014. « Cradle-to-gate Life Cycle Assessment of forest operations in Europe: environmental and energy profiles ». *Journal of Cleaner Production* 66 (mars): 188-98. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.11.067>.
- IGN-IFN. 2022. « Memento - Inventaire Forestier National ».
- Pro Silva France. 2019. « Lettre de Pro Silva France n°76 », avril 2019. <https://prosilva.fr/files/lettres/lettrepf-76.pdf>.
- . 2020a. « Lettre de Pro Silva France n°80 », septembre 2020. <https://prosilva.fr/files/lettres/lettrepf-80.pdf>.
- . 2020b. « Les forêts publiques gérées en traitement irrégulier. Développements récents en Ile de France ». <https://prosilva.fr/actualites-2/les-forets-publiques-gerees-en-traitement-irregulier-developpements-recents-en-ile-de-france>.
- . 2021. « Lettre de Pro Silva France n°81 », avril 2021. <https://prosilva.fr/files/lettres/lettrepf-81.pdf>.

12. Annexe 1 – Annexe technique d'estimation carbone

Annexe technique d'estimation carbone

(Pro Silva / AFI / SF-CDC)

L'objectif de cette annexe est de présenter les méthodes et hypothèses retenues pour estimer le stockage additionnel de CO₂ dans les itinéraires sylvicoles Projet de la Méthode, par rapport à ses itinéraires de Référence. Les différents points de cette annexe ont été partagés en comité de pilotage avec les membres de la filière et ont fait l'objet de discussions, évolutions et arbitrages afin d'être le plus rigoureux possible à l'aune des connaissances actuelles.

Le document est structuré comme suit :

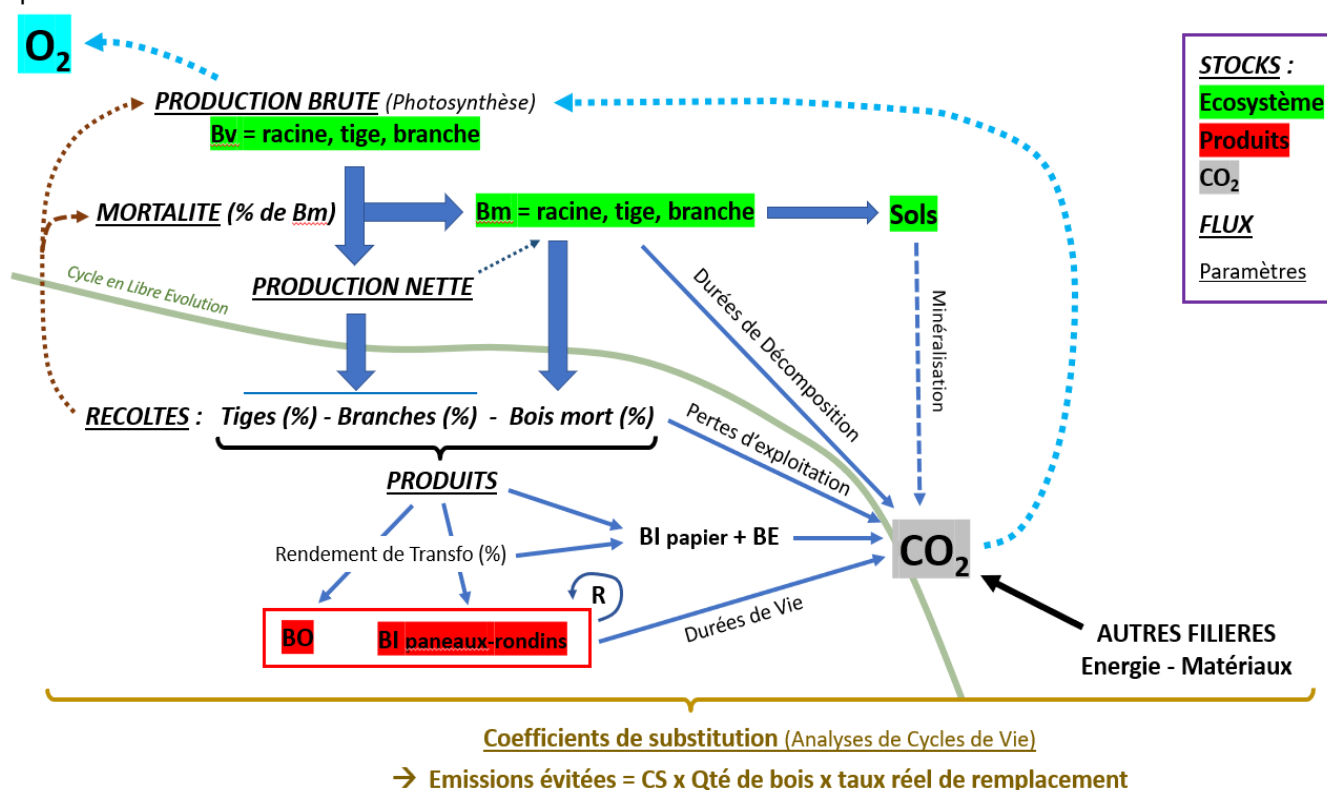
1. Principes de l'estimation et compartiments intégrés	41
2. Forme et accessibilité du calculateur PRM	45
3. Choix méthodologiques.....	46
3.1. Approche générale.....	46
3.2. Biomasse vivante des arbres (Bv)	48
3.2.1. Approche théorique et implications pour la méthode.....	48
3.2.2. Production brute - principes de base.....	49
3.2.3. Modèles de croissance en hauteur	50
3.2.4. Modèles de croissance en surface terrière	53
3.2.5. Evolution de la biomasse vivante totale des arbres	54
3.3. Biomasse du sous-étage (Bvs).....	55
3.4. Biomasse Morte (Bm)	56
3.5. Carbone du sol (S).....	58
3.5.1. Approche globale.....	58
3.5.2. Stock initial.....	58
3.5.3. Variations de stock sur 30 ans	60
3.6. Produits-Bois (Pb)	62
3.6.1. Volumes de produits récoltés	62
3.6.2. Stock de carbone généré.....	63
3.7. Contenu en carbone du bois	64
4. Intégration des paramètres des scénarios sylvicoles.....	64
5. Synthèse opérationnelle.....	65

1. Principes de l'estimation et compartiments intégrés

Etudier le cycle du carbone forestier à une échelle donnée est un exercice complexe. Depuis le protocole de Kyoto, les préoccupations citoyennes et les engagements climatiques des Etats engendrent de nombreuses estimations du potentiel d'atténuation du système forêt-bois à l'échelle nationale, régionale ou locale. Les méthodes et certifications utilisées utilisent parfois un grand nombre d'approximations et d'hypothèses non vérifiées. Produire une méthode d'estimation du stockage additionnel demande d'intégrer de nombreux paramètres pour réduire au maximum les erreurs potentielles.

Le Projet « Climafor (Gleizes 2017) fait une analyse d'une série de méthodes utilisées, en distinguant leur niveau de détail. Parmi les calculateurs étudiés, celui du bilan du carbone du secteur forestier canadien (MBC-SFC3 et CR-FVS) est un des plus complexes et adaptables (Kull et al., 2014). Au sens de ce rapport, le calculateur développé dans notre méthode est de type 2 (calculateur sous Excel) mais avec la souplesse et les résultats d'un type 3 (simulation des flux et stocks de tous les compartiments pour plusieurs scénarios).

Le schéma ci-dessous présente le cycle du carbone dans le système forêt-bois-atmosphère avec les compartiments de stockage (végétaux, sols, produits-bois), les flux entre ces compartiments et les émissions potentiellement évitées par le remplacement, par le bois, de sources d'énergies et de matériaux plus émetteurs. Ce schéma est développé dans un rapport récent qui détaille les données, équations et paramètres permettant d'estimer tous les flux et les stocks du système forêt-bois à l'échelle nationale (du Bus de Warnaffe & Angerand 2020). Pour cette méthode, le calculateur « PRM » (Production-Récolte-Mortalité) a été largement adapté et affiné pour être utilisable à l'échelle de la parcelle.



Le bénéfice climatique total d'un scénario donné sur un espace et une période donnée est alors égal à :

Carbone net séquestré dans l'Ecosystème (variation de stock)

+ Carbone net stocké dans les produits récoltés (variation de stock)

En appliquant le principe de conservation, les émissions ou les stockages nets peuvent être calculés 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 de stockage	Entrées	Sorties
Biomasse vivante des arbres (Bv) = Troncs + Branches + Racines	Production (photosynthèse) brute	Mortalité et Prélèvements
Biomasse vivante du sous-étage (Bse)	Production brute	Mortalité (+ Récoltes éventuelles)
Biomasse morte (Bm)	Mortalité Pertes d'exploitation	Récoltes + Décomposition
Carbone du sol (S)	Intégration de la biomasse morte	Respiration (minéralisation de la matière organique)
Produits-bois (Pb)	Récoltes (= prélèvements – pertes d'exploit.)	Combustion finale des produits (ou minéralisation par enfouissement)

Soit : Emissions nettes générées sur une période donnée = $\Delta Bv + \Delta Bse + \Delta Bm + \Delta S + \Delta Pb$

Avec : $\Delta Bv = \sum (\text{Production Bv} - \text{Récolte Bv} - \text{Mortalité Bv})$

$\Delta Bm = \sum (\text{Mortalité Bv} - \text{Récolte Bm} - \text{Décomposition Bm})$

$\Delta S = \sum (\text{Intégration dans le sol} - \text{Respiration/Minéralisation})$

$\Delta Pb = \sum (\text{Apport de Pb durables} - \text{Combustion/Décomposition des Pb})$

Il s'agit d'équations de transfert dont il faut préciser les paramètres.

Pour estimer ces différences de stocks, 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.

Pour réaliser les calculs prospectifs de stocks, nous nous sommes appuyés sur plusieurs méthodes (Loustau 2004, Gleizes 2017, Roux et al 2017, EFSE 2019, Valade et al 2017, Gleizes & Martel 2019). Un modèle « PRM » (production-récolte-mortalité) a été construit pour simuler les stocks et les flux par hectare pour tous les compartiments d'un peuplement caractérisé.

Au bénéfice climatique de la différence de stock dans l'écosystème et les produits peut éventuellement s'ajouter les émissions effectivement évitées par substitution par le bois de produits et énergie plus émetteurs (s'il peut être établi), et être déduit les émissions additionnelles par la mise en place du projet

(émissions pour le dossier, sa certification et son suivi, dues aux déplacements spécifiques du porteur du projet (propriétaire, gestionnaire), du financeur, de l'administration et de l'organisme auditeur.

Substitution

Les effets d'atténuation habituels sont souvent résumés par le signe « 3S » : séquestration dans l'écosystème, stockage dans les produits bois, substitution grâce aux produits bois. Cependant, les réflexions menées lors du COPIL ont abouti à un traitement différent de l'effet substitution par rapport aux méthodologies actuelles. Les paragraphes suivants expliquent cette position.

La substitution se définit par les émissions potentiellement évitées par le remplacement, par le bois, de sources d'énergies et de matériaux jugés plus émetteurs. Les émissions évitées par le remplacement peuvent s'estimer comme suit :

Emissions évitées par l'usage du bois = $Q_{\text{bois}} \times CS$

Avec : Q_{bois} = quantités de bois utilisée (m^3)

Et : CS = coefficient de substitution du produit bois par rapport au concurrent remplacé ($t\text{-CO}_2/m^3$).

Ce potentiel d'atténuation est souvent associé à la sylviculture. Or cette attribution est aujourd'hui critiquée par la littérature du fait du caractère relatif de la substitution sur des études françaises (Valade et al 2020, Valade 2022) ou par des auteurs de revues internationales du fait des hypothèses utilisées (Leturcq 2020).

La substitution entraîne en effet un bénéfice *potentiel*, qui ne sera effectif que si un *remplacement* a réellement lieu (et non une *addition*) et que le coefficient de substitution est positif et peut être déterminé. La substitution par le bois d'énergies peu émettrices (hydraulique, éolien, solaire, nucléaire) peut générer une hausse des émissions, et dans le cadre d'une filière mondialisée même l'usage de bois d'œuvre peut engendrer des coefficients de substitution négatifs. Valoriser la substitution impose donc de connaître l'usage final du bois récolté, la nature du produit concurrent et le cycle de vie complet des deux produits (Valade 2023). Or le propriétaire et le gestionnaire forestier sont dans l'incapacité technique de connaître avec certitude l'ensemble des étapes aval, et sont même dans l'incapacité légale de les maîtriser. La seule donnée connue est la qualité du bois vendue et son utilisation potentielle, sans en laisser présager les différentes utilisations. Ils peuvent seulement influencer, en partie, la destination de la première transformation, mais sans connaître l'usage final des produits (par exemple, pour une vente de bois à destination d'usines de papeteries ou de panneaux la grande majorité de ces produits seront destinés à cette utilisation mais une partie pourrait être redistribuée à des fins d'autres utilisations, idem pour des ventes de bois d'œuvre qui peuvent être aussi bien destinés à de la construction in fine qu'à d'autres produits).

De plus, les émissions évitées par l'usage du bois sont revendiquées par les acteurs de l'aval, donc les comptabiliser au niveau de la gestion forestière risquerait d'engendrer de multiples comptages. Ces émissions évitées ne peuvent être justifiées et vérifiées au niveau de la forêt mais en aval, à minima à partir de la première transformation, pour autant que celle-ci maîtrise les paramètres listés ci-dessus. Seuls les acteurs de l'aval sont susceptibles de pouvoir démontrer que les bois viennent bien substituer un matériau concurrent et d'en estimer le bénéfice climatique à partir du coefficient de substitution.

Enfin, les coefficients de substitution disponibles présentent de très fortes variations et sont susceptibles d'évoluer dans le temps. Les efforts réalisés par les filières concurrentes (ex. béton recyclé, mix énergétique décarboné) peuvent par exemple les faire baisser.

Ces éléments donnent aux « émissions évitées par substitution » un caractère très hypothétique et les rendent non attribuables aux producteurs de bois, sauf à considérer qu'une infime part de la responsabilité leur reviendrait par la mise en marché des bois, aujourd'hui non quantifiable.

Par ailleurs, la présente méthode vise le maintien sur pied de peuplements matures récoltables. La proportion de bois mobilisable est donc importante et l'hypothétique effet substitution serait non négligeable et les erreurs possibles sur cet effet pourraient être élevées.

Ainsi nous ne les intégrons pas dans les compartiments carbone prévus dans cette méthode. Il s'agit d'un arbitrage de rigueur comptable pour éviter tout risque de surestimation.

Pour aller plus loin :

On notera qu'attribuer le stockage dans les produits bois au sylviculteur pose un problème comparable car celui-ci ne maîtrise pas l'usage final des bois donc la durée de vie des bois qu'il met en vente. La vente « sur pied » par exemple, aujourd'hui majoritaire en France, ne permet pas au gestionnaire forestier d'assurer la hiérarchie des usages des bois récoltés puisqu'il n'en assure pas le tri et la valorisation, de sorte que le stockage réel peut être inférieur au stockage estimé à partir du potentiel des bois récoltés. Même en cas de vente « bord de route » (exploitation et tri des bois à la charge des propriétaires), propriétaire et gestionnaire n'ont pas la capacité légale d'interdire d'utiliser par exemple des bois sciabls en bois-énergie, qui reste sous la responsabilité des acheteurs. Or les contraintes de tri et les opportunités commerciales amènent parfois à de telles pertes. Par ailleurs le tri des produits bord de route n'est qu'une étape vers une différenciation plus fine des produits-bois finaux au cours des étapes de transformation, auxquelles n'ont pas accès le propriétaire et gestionnaire. Toutefois le degré d'incertitude (et donc l'erreur potentielle) de ce compartiment est nettement plus faible que pour la substitution.

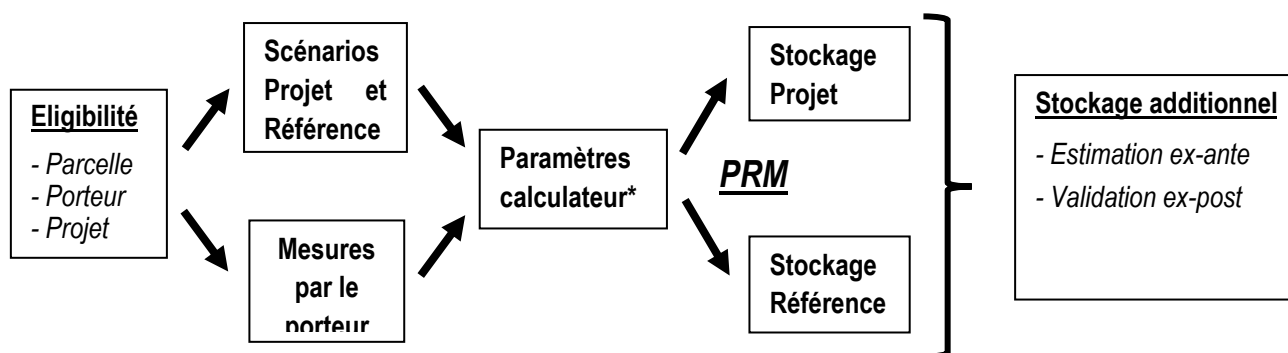
Le risque éventuel de défaut d'approvisionnement potentiel des industriels du fait de l'allongement des révolutions est très relatif. En effet, avec des cycles courts la récolte regroupée des plantations FFN produirait un pic d'approvisionnement puis un creux important (avec probablement de fortes variations de prix), tandis que des récoltes étalées stabiliseraient les approvisionnements et les marchés sur le long terme.

Emissions de gestion forestière

Enfin, il faut normalement aussi considérer les **émissions générées par la récolte du bois et les travaux sylvicoles** (ex. plantation). Cependant l'état actuel des connaissances ne permet pas d'attribuer des valeurs fiables selon le scénario de gestion. En effet à ce stade il n'existe pas encore de quantification des émissions liées à l'exploitation forestière suivant les sylvicultures et les itinéraires, qui iraient de 0,12 à 0,56 t-eqCO₂/ha/an selon les espèces (González-García et al. 2013, González-García et al. 2014, Brunori et al. 2017). A défaut de pouvoir chiffrer ces impacts, dans cette méthode comparant plusieurs scénarios de référence et projet avec exploitation, nous considérerons les émissions comparables donc sans additionnalité.

2. Forme et accessibilité du calculateur PRM

Le calculateur « PRM » (Production-Récolte-Mortalité) s'insère dans la Méthode selon le diagramme ci-dessous :



La recherche des paramètres et de leur cadrage représente un travail de recherche important. Le tableau ci-dessous les résume, avec les groupes de facteurs dont ils dépendent : essences du peuplement (Es), station (St), scénario sylvicole étudié (Se), filière-bois dans lequel s'effectue la récolte (Fil).

		Variables (fixes ou évolutives sur 30 ans)	Unité	Es	St	Sy	Fil
STOCKAGE	P	Production brute du peuplement considéré	m ³ / ha / an	X	X	X	
	M	Mortalité naturelle annuelle du peuplement	% du volume total sur pied	X	X	X	
	Dm	Durée de vie moyenne du bois mort des essences	Nombre d'années (selon bois)	X	X	X	
	Ss	Stockage annuel de carbone dans le sous-étage	t-eqCO ₂ / ha / an	X	X	X	
	S	Stockage annuel de carbone dans le sol	t-eqCO ₂ / ha / an	X	X	X	
SEQUESTRATION	Rt	Récolte appliquée aux troncs	% du volume tige (tronc)			X	
	Rbr	Récolte appliquée aux branches*	% du volume branches			X	
	Rm	Récolte bois mort appliquée au peuplement	% du volume mort annuellement			X	
	%BO	Part de bois durable potentiel dans la tige	% du volume tige total	X		X	X
	Vbo	Taux de valorisation potentiel en produits durables	% du volume de tige (tronc) prélevé			X	X
	Tp	Rendement transformation du BO récolté	BO récolté / BO final (%)				X
	Dp	Durées de vie moyenne des bois récoltés	Nombre d'années (selon produit)				X
	ID	Infradensité du bois	t.MS / m ³	X			
	TC	Taux de carbone du bois (matière sèche)	t.C / t.MS (ou t-eqCO ₂ / ha)	X			
S	CSe	Coefficient de substitution énergie	t-eqCO ₂ / m ³				X

	CSm	Coefficient de substitution matériau	t-eqCO ₂ / m ³				X
	TS	Taux de substitution effectif	% effectivement remplacé par le bois				X

* On suppose nulle la récolte appliquée aux souches. Pour les branches, une récolte partielle est appliquée en feuillus.

Le calculateur doit ainsi intégrer des paramètres de trois types :

- imposés par la méthode selon la situation de départ et l'itinéraire choisi (fixes ou variables sur 30 ans) ;
- à fixer par l'utilisateur selon des règles définies par la méthode ;
- mesurés avant projet par l'utilisateur dans chaque type de peuplement des parcelles étudiées.

Le calculateur est codé par Marie-Laure Martin-Bellier de l'Association Futaie Irrégulière, à partir d'une adaptation au niveau de la parcelle du modèle Excel « PRM » développé à l'échelle nationale (Du Bus de Warnaffe & Angerand 2020), avec les choix méthodologiques présentés intégralement dans cette Annexe. Il est réalisé sous le **logiciel de traitement de données R, plus particulièrement le package Shiny** qui permet de mettre en place une interface utilisateur. Le porteur de projet devra utiliser cette interface Shiny qui sera déposée en ligne pour la rendre accessible et garantir à ses auteurs que la Méthode est bien utilisée.

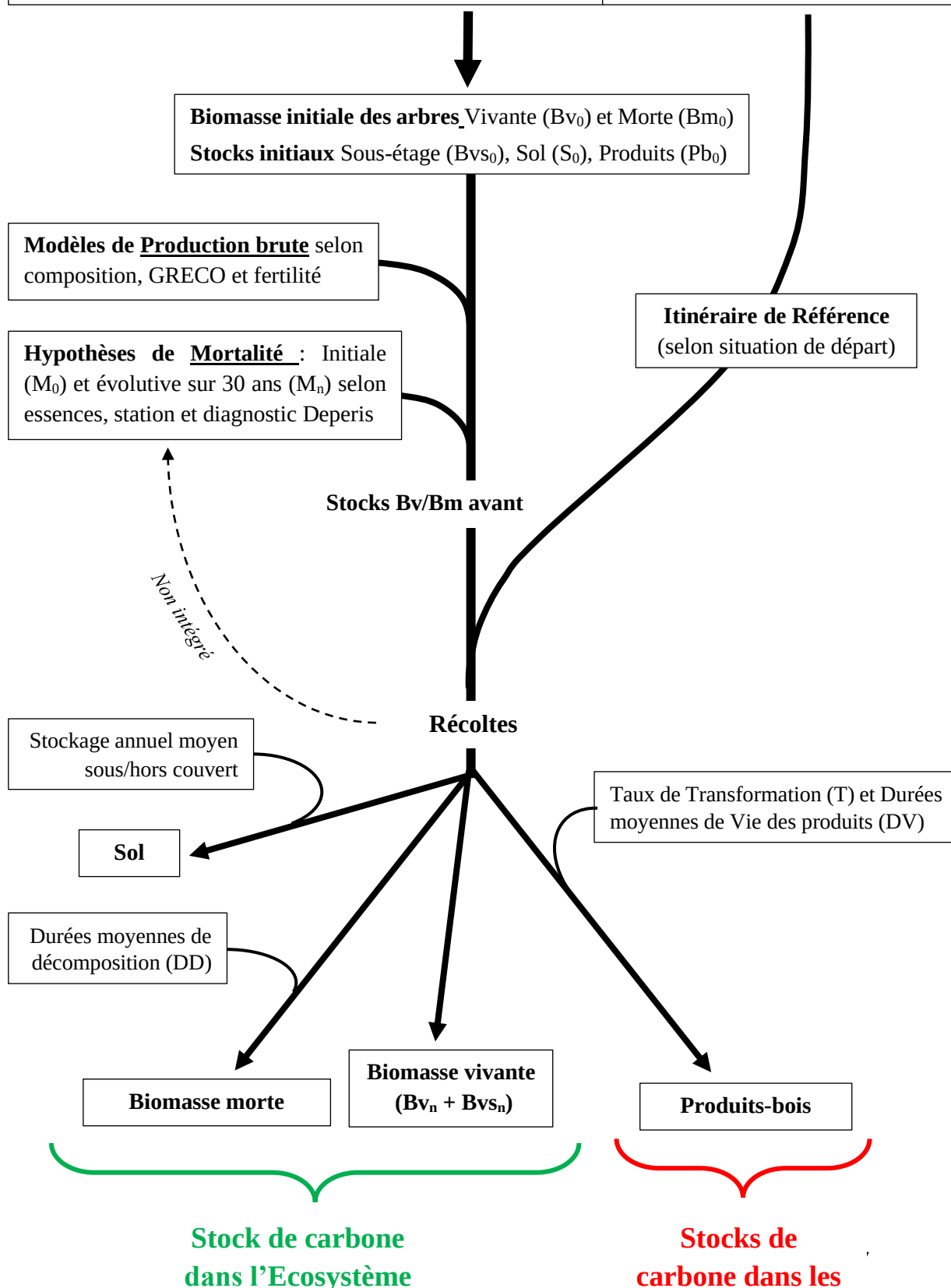
Le travail majeur n'est pas de construire le protocole informatique de base, mais de fixer les paramètres de manière la plus solide qui soit, afin de rendre les calculs crédibles et de réduire l'usage des rabais dans l'estimation du projet avant les mesures *ex-post*.

3. Choix méthodologiques

3.1. Approche générale

L'arbre figuré en page suivante montre le protocole adopté pour générer les estimations chiffrées à partir des paramètres d'entrée du calculateur PRM.

DONNEES FOURNIES PAR LE PORTEUR D'UN PROJET ELIGIBLE	
GRECO (grande région écologique IGN) et données stationnelles <u>Par essence</u> : G_{total} , G en $D > TE_{mini}$, H_o , % Deperis, % houppier vert, G bois morts debout, volume bois mort à terre estimé, régénération (% de surface, essences, hauteur)	% actuels du volume en produits BIBE, palette et charpente/menuiserie Itinéraire Projet (coupes = années + %Récolte Tige-Branches-BoisMort)



3.2. Biomasse vivante des arbres (Bv)

3.2.1. Approche théorique et implications pour la méthode

Comme toute population biologique, dans un peuplement d'arbres naissant en environnement stable, 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 lorsque la production est compensée par la mortalité (Zeide 1993). Une fois le couvert fermé, si production et prélèvement sont constants, l'évolution du volume peut s'écrire :

$$dBv/dn = P - R - M \quad \text{où :} \quad \begin{aligned} Bv &= \text{volume ligneux vivant (m}^3/\text{ha)} ; n = \text{année} ; \\ P &= \text{production biologique de l'année } n \text{ (m}^3/\text{ha/an)} \\ R &= \text{récolte + pertes d'exploitation de l'année } n \text{ (m}^3/\text{ha/an)} \\ M &= \text{mortalité de la biomasse à l'année (m}^3/\text{ha/an)} \end{aligned}$$

La résolution de cette équation différentielle est une exponentielle donne l'évolution du volume de biomasse avec le temps. Si le taux de mortalité en % de Bv ne varie pas, il peut être caractérisé par une constante de renouvellement du volume sur pied telle que $M = 1/T$, et la résolution de l'équation différentielle donne :

$$Bv_n = Bv_0 \times \exp(-n/T) + T \times (P - R) \times [1 - \exp(-n/T)] \quad \text{où } Bv_0 = \text{volume initial}$$

Cette expression donne une courbe logistique où T caractérise la rapidité d'évolution du capital sur pied vers sa valeur asymptotique $T(P-R)$. Comme $T = 1/M$, 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, 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.

Dans notre calculateur PRM, nous estimerons l'évolution du volume par incréments annuels plutôt que par la formule exponentielle, les deux donnant le même résultat.

Si : P_n = production brute de l'année n ($\text{m}^3/\text{ha/an}$)
R = récolte en % de la biomasse vivante
 M_n = mortalité de l'année n en % de Bv_n ;

Alors la biomasse vivante évolue comme suit d'une année à la suivante (de n-1 à n) :

$$Bv_n = Bv_{n-1} \times (1 - M_n) \times (1 - R) + P_n$$

L'évolution de la biomasse doit être estimée pour le bois de la tige, des branches et des racines. Parmi les calculateurs analysés par Climafor (2017), certains n'estiment pas la biomasse souterraine alors que dans certaines situations ou avec certaines pratiques, ses variations de stock peuvent être importants (Augusto et al 2019, Landmann et al 2023). Par exemple Selon Derrien (2018), exporter les racines produit un déstockage très important.

Pour la production brute P les compartiments tige, branches et racine sont indissociables, mais pour la récolte R et la mortalité M ils peuvent évoluer différemment. En effet si la récolte des racines est généralement nulle, celle de la tige est souvent complète (selon le « fin bout » retenu par l'exploitant) et celle des branches est très variable (souvent nulle en résineux mais nulle à élevée en feuillus). Ainsi la mortalité comme la coupe entraînent la mort des racines et leur décomposition sur place (transfert de Bv vers Bm), tandis que pour la tige et les branches, ces deux déterminants peuvent transférer de la biomasse du compartiment Bv au compartiment Pb (produits) s'ils sont récoltés, et au compartiment Bm (bois mort) s'ils ne le sont pas (notion de pertes d'exploitation). Estimer l'évolution du carbone de la biomasse demande donc de préciser les taux de récolte de la tige et des branches. Ceux-ci sont intégrés

dans le calculateur, définis par défaut pour les scénarios de référence et au choix du porteur de projet pour le scénario de projet.

3.2.2. Production brute - principes de base

Pour les estimations de stockage carbone, on peut utiliser :

- les données de production estimées par l'IGN (P en m³/ha/an) à partir de ses inventaires ;
- ou les tables de production telles que rassemblées par le projet Biosylve (Mongermont et al 2023).

Or les premières ne sont pas adaptées pour tracer l'évolution de la production d'un peuplement donné selon son âge et la fertilité de la station. Les deuxièmes sont anciennes (elles n'intègrent pas les évolutions climatiques), fragmentaires et souvent inadaptées à la France.

Pour cette méthode, **nous avons choisi de produire des modèles d'accroissement courant à partir des données IGN 2006-2021**. Ce choix fort impose d'estimer la croissance en hauteur et en surface terrière. L'objectif était de simuler l'évolution de la hauteur moyenne et de la surface terrière totale du peuplement, à partir de la valeur initiale mesurée (itinéraire-projet) et de la valeur 0 (itinéraire de référence), en intégrant ensuite les prélèvements prévus.

En cas de mélange, on supposera que l'évolution des volumes est la somme pondérée de l'évolution par essence. En effet l'effet dépressif du mélange est rare selon X.Morin (spécialiste de ces questions au CEFE), la production brute totale d'un mélange étant plus souvent 5 à 10% supérieure la somme pondérée de celle des essences en peuplement pur.

Pour les mélanges d'essences, la production brute est la somme pondérée des essences présentes (en surface terrière), en retenant les modèles de production suivants :

Résineux Feuillus \	1 essence	2 essences	3 essences ou plus
1 essence	Modèle des 2 essences	Modèle des 3 essences	Modèle du Rx + Mod. des 1 ^e et 2 ^e Fu + Mod. 2
2 essences	Modèle des 3 essences	Modèle des 2 résineux + Modèle du 1 ^e feuillus + Modèle 2	
3 essences ou plus	Modèle des 2 premiers résineux + Modèle du 1 ^e feuillus + Modèle 1		

Modèle 1 : pin d'Alep en Greco Méditerranée et Corse

(Rx) pin noir d'Autriche de la Greco H si on est en Greco H, du Groupe 1 (A-B-C-E-F-I-J) ailleurs

Modèle 2 : chêne vert en Greco Méditerranée et Corse

(Fu) chêne pubescent Groupe 2 si on est en Greco H, Groupe 1 (B-F-G-I) ailleurs.

A noter : Les modèles 1 et 2 ont été volontairement choisis parmi des essences peu productives pour éviter de surestimer le stockage. Ces modèles « par défaut » sont également utilisés pour les essences sans modèle, qui ne peuvent représenter que 30% maximum pour que le projet soit éligible.

La fertilité utilisée est définie par l'essence majoritaire du peuplement, en se basant sur les informations d'hauteur dominante déterminée. Autrement dit, les modèles de production utilisés se réfèrent à ceux des trois premières essences déterminées selon leur surface terrière, lorsque ces modèles sont existants. Le cas échéant, ou en cas de diversification importante, les modèles utilisés seront rapprochés par des modèles qui permettent d'éviter une surestimation pour cette première évaluation. Les réelles productions seront recalculées et vérifiées lors de la quantification *ex-post*.

Pour le **cubage Ex-Post**, il sera fait usage des mêmes expressions mathématiques, mais avec les données réelles récoltées sur le terrain (surface terrière, hauteur ...).

Le changement climatique aura très probablement un impact sur la production brute des peuplements étudiés par rapport aux données IGN 2006-2021. Si jusque vers 2000 la hausse de la concentration du CO₂ dans l'atmosphère a eu plutôt un effet fertilisant, cet effet positif semble aujourd'hui faible et pourrait s'inverser dans certaines conditions. Entre les périodes 2006-2013 et 2012-2020 la production biologique brute a baissé de 4%, la mortalité a augmenté de 54% et les prélèvements ont augmenté de 20% (Memento IGN 2022).

Enfin, avec l'évolution climatique la croissance des peuplements sera de plus en plus influencée par les épisodes extrêmes que sont canicules, sécheresses, tempêtes et feux, ainsi que la pression des pathogènes favorisée par les fragilités induites. Toutefois intégrer l'impact possible de telles « crises » dans la Méthode imposerait l'usage de modèles écophysiologiques bien trop complexes pour une estimation, l'attribution se faisant par un système *ex-post*. La prise en compte des risques avec les rabais incendie et de non permanence permettent d'obtenir une première prise en compte générique de ces effets. Nous intégrons toutefois cette perspective de dégradation de la productivité nette des peuplements par deux moyens :

- 1) Des modèles de production brute basés sur les données les plus récentes, prudents voir pessimistes : les valeurs obtenues par le protocole ci-dessus sont pour chaque essence inférieures aux productions moyennes 2018-2022 relevées par l'IGN et à celles constatées sur les dispositifs AFI ;
- 2) Une hausse graduelle des taux annuels de mortalité (voir 3.4).

Sur la base des risques évalués au moyen de guides fournis par la méthode, ces calculs permettent d'estimer de la façon la plus objective possible le potentiel *ex-ante*, qui sera attribué uniquement *ex-post*.

3.2.3. Modèles de croissance en hauteur

L'évolution de la hauteur est une donnée centrale pour la production brute. En effet selon la loi d'Eichhorn, la production totale d'un peuplement équié, monospécifique et complet dépend uniquement de sa hauteur. Cette loi a pu être largement vérifiée avec la hauteur dominante ou la hauteur moyenne. Autrement dit, à un âge donné la hauteur et la production totales dépendent de la fertilité mais pas du régime d'éclaircie, à condition que les éclaircies ne soient pas trop fortes (voir plus bas).

L'objectif du travail réalisé dans le cadre de cette méthode était d'établir, pour chaque essence et selon la fertilité de la station, une courbe de hauteur totale (H_{tot}) dominante en fonction de l'âge de l'arbre. Les modèles produits permettent de prévoir l'évolution de H_{tot} à partir de la hauteur mesurée initialement pour l'itinéraire projet, et de H_{tot}=0 après la coupe rase de l'itinéraire de référence.

Pour ce faire, nous construisons des courbes à partir des données IGN 2006-2021, en utilisant les variables HTOT (hauteur totale en mètres) et AGE13 (âge réel de l'arbre à 1,30m au-dessus du niveau de base (par sondage à la tarière ou décompte des verticilles). Pour réduire la variabilité et l'incertitude, on a retiré des échantillons les âges extrêmes (10% les plus élevés). Nous avons retenu pour chaque placette la moyenne des 2 arbres dominants (où sont mesurés âge et hauteur totale). Pour transformer les âges estimés à 1m30 en âges réels, nous avons ajouté :

- en feuillus (taillis) : 2 ans pour châtaignier et robinier, 4 ans pour hêtre, chêne sessile et chêne pédonculé ;
- pour les résineux (plantations) : 4 ans pour douglas, épicéa et mélèze, 6 ans pour cèdre et pins, 7 ans pour sapin.

Dans les peuplements réguliers, équiens purs et complets, les statuts sociaux et la sylviculture engendrent des écarts entre hauteurs dominante et moyenne dépassant rarement 10% selon M.Brucchiamachie (AgroParisTech) et sont généralement de l'ordre de 5%. Nous poserons donc : Hm

= $0,95 \times H_o$ (H_o = moyenne des 2 dominants), pour une essence majoritaire résineuse donnée et sur même station. Pour les peuplements à majorité feuillus, au vu de la variabilité plus importante, nous poserons : $H_m = 0,90 \times H_o$.

Pour la **sous-méthode « Futaie résineuse »**, nous avons utilisé l'échantillon France métropolitaine pour les placettes dont une essence représente au moins 70% de la surface terrière totale. Sur cet échantillon, les données de base sont l'âge et la hauteur totale des deux arbres dominants de la placette. Les placettes de peuplements à structure irrégulière selon l'IGN (variable SVER) ont été exclues pour éviter l'effet de compression initiale. Le seuil de 200 placettes a été fixé pour avoir un échantillon représentatif ; au-delà, les Greco ont été regroupées pour avoir des échantillons représentatifs de manière la plus cohérente possible selon leurs particularités biogéographiques. De fait, les placettes en futaie irrégulière en sapinières du nord-est et en pin laricio de Corse ont été exclues pour éviter un biais de hauteur par effet « salle d'attente ». En effet, même si ce biais devrait être assez faible en ne retenant que les arbres dominants, il a été décelé comme significatif.

Une règle a dû être posée pour la cohérence des données, afin d'obtenir une relation fiable entre hauteur et âge à partir des deux arbres dominants décrits par l'IGN dans chaque placette :

- moyenne des 2 hauteurs et des deux âges si écart d'âge < 10 ans et écart hauteur < 30% ;
- suppression de la placette si écart d'âge < 10 ans et écart hauteur > 30% ;
- suppression de l'arbre le moins haut si écart d'âge > 10 ans.

Essence	GRECO avec > 200 placettes	Regroupement de GRECO
Douglas *	G (1195), B (236)	Groupe 1 = A + C + D + E + F + I + J (408)
Pin maritime	B (432), F (2435), A (210)	Groupe 1 = G + I + J + K (242)
Pin sylvestre	G (893)	Groupe 1 = H + I + J (934) Groupe 2 = C + D + E (290) Groupe 3 = A + B + F (613)
Pin noir d'Autriche	H (203)	Groupe 1 = A + B + C + E + F + G + I + J (373)
Pins laricio de Corse	B (347)	Groupe 1 = A + C + E + F + G + H + I + J + K (386)
Mélèzes d'Europe Alpes	H (260)	(hors Alpes = 51 placettes)
Sapin pectiné	G (697)	C + D + E (730), I + H (285)
Epicéa commun	D (307), E (322), G (671)	Groupe 1 = H + I (370) Groupe 2 = A + B + C (420)
Pin d'Alep	J (622)	-
Toutes Greco / Modèle national instable : Epicéa de Sitka (175), Cèdre de l'Atlas (60) / Modèle national impossible : Mélèze du Japon (38 placettes) Mélèze hybride, pins de Calabre et de Salzmann, sapins méridionaux (<20 placettes).		

Remarques :

- Le Douglas aurait pu être regroupé en GRECO A+B et C+D mais les courbes obtenues sont assez similaires ;
- En pin maritime et en pin laricio la GRECO K seule constitue un échantillon trop faible ;
- En sapin pectiné, pour les GRECO A, B et F on peut utiliser les courbes du groupe C-D-E ou G.

Pour la **sous-méthode « Taillis »**, les données de base sont issues de l'échantillon France métropolitaine pour les placettes de taillis simple ou mélanges T/F pauvre en réserves, définis par moins de 50% de la surface terrière totale et maximum 5 m²/ha en francs-pieds. Les tiges dominantes peuvent être des francs-pieds, cas assez fréquent en chênes sessile/pédonculé et hêtre. Mais la variable IGN « origine » n'est pas très fiable et tenter d'exclure les mesures sur francs-pied aurait été artificiel (ces arbres existent dans les peuplements éligibles) tout en réduisant l'échantillon donc la valeur des courbes obtenues. Pour l'usage des données des deux arbres mesurés par l'IGN, la règle posée pour les résineux a également été utilisée pour les taillis.

Essence	Greco seule	Groupe 1	Groupe 2	Groupe 3
Chêne pubescent	-	B + F + G + I (953)	H + J K (807)	-
Chêne vert	-	F + G H + I + J + K (828)	-	-
Châtaignier	G (459)	A + B C (358)	F + I (409)	-
Robinier faux-acacia	-	Toutes Greco (331)	-	-
Hêtre	-	C + D + E (216)	G + H + I (430)	-
Chêne sessile	-	A + B (400)	C + D + E + H (250)	G + F + I (207)
Chêne pédonculé	-	A + B C + D + E + F G + I (921)		

* Les placettes où la différentiation entre chêne sessile et pédonculé n'a pas été effectuée ont été exclues.

Remarques :

1) Avec l'exclusion de l'année 2005 et les règles de hauteur il est impossible d'individualiser la Corse pour le chêne vert, et pour le chêne pédonculé la Greco G passe en-dessous du seuil des 200 placettes. En chêne pédonculé il a été décidé de faire un seul modèle global car des modèles par GRECO ou groupes de GRECO cohérents (station) avec plus de 200 placettes donnent des résultats similaires.

2) Il faudra rapprocher :

- En châtaignier : les GRECO D, E, H et I (moins de 10 placettes conformes) de la courbe d'une GRECO comparable ;
- En hêtre : les GRECO A (11), B (43) et F (4) (hêtres « de plaine ») de la courbe des GRECO C/D/E.

Pour réaliser les courbes en résineux et feuillus, une division des hauteurs en 3 quantiles a été réalisée à partir des seuils 30 et 70% de la hauteur maximale relevée, les quantiles d'amplitude 30%-40%-30% étant définis pour optimiser la courbe moyenne (à priori la plus souvent utilisée) et obtenir des écarts suffisants entre les trois courbes. Les trois courbes ont d'abord été établies par régression de LOESS pour visualiser le centre de chaque quantile. Puis une courbe exponentielle de type allométrique (la plus proche d'une courbe biologique) par utilisation du package IMFOR (Mehtatalo et al 2015), qui fournit des fonctions non linéaires modélisant la hauteur d'un arbre à partir des diamètres (âges) et de la courbe Loess équivalente.

Le modèle de courbe biologique utilisé est le suivant :

$$HTOT = AGE^2 / (exp(A) + exp(B)*AGE)^2$$

Où A et B sont des paramètres propres à chaque essence/fertilité/GECO.

Ensuite, si nécessaire la partie droite de la courbe (peuplements âgés, peu de points IGN) a été recalibrée par les plafonds de hauteurs relevés sur les placettes AFI et par consultation d'experts pour chaque courbe essence/GRECO/fertilité. Il faut noter que les trois courbes obtenues ne décrivent pas vraiment trois « classes de fertilité », car les échantillons utilisés pour les définir ne sont pas créés à partir de variables stationnelles (ce travail demanderait une analyse multivariée avec toutes les variables stationnelles, et ne fournirait pas nécessairement des courbes différentes ou avec un degré de confiance supérieur).

Les modèles de croissance obtenus sont donnés par essence **en Annexes**.

3.2.4. Modèles de croissance en surface terrière

Les points surface terrière / âge issus des données IGN ne peuvent être utilisés pour simuler l'évolution de la surface terrière car celle-ci dépend fortement du régime de coupe. Il est donc nécessaire de construire la courbe $G=f(\text{âge})$ à partir de l'accroissement annuel en surface terrière. En $m^2/ha/an$ il vaut dans les dispositifs entre 0,25 et 0,55 en chêne et 0,5 à 1,75 en douglas, données confirmées par notre enquête auprès des gestionnaires (experts et gestionnaires, ONF, CNPF...). Mais dans ces fourchettes, la relation à l'âge n'est pas connue.

Pour estimer l'accroissement en surface terrière à partir des données IGN il faut utiliser la variable IR5 (accroissement radial moyen sur 5 ans) (Gleizes 2017). Sur les arbres dits « non simplifiés » (avec mesure de IR5 et Htot) nous avons retenu les arbres de l'essence majoritaire (constituant plus de 70% du Gtotal), considérés comme un échantillon représentatif de la placette. Ceci permet d'obtenir l'accroissement individuel en m^2/an avec la formule IGN suivante, où b exprime le taux d'écorce de l'essence :

$$AcctG = \frac{\pi}{5} \times \frac{IR5}{1 - 2\pi b} \times \left(\frac{C}{\pi} - \frac{IR5}{1 - 2\pi b} \right) \times W$$

Où C est la circonférence individuelle de l'arbre et W le poids surfacique de l'arbre.

On obtient alors l'accroissement annuel estimé du peuplement (en $m^2/ha/an$) avec la somme des accroissements individuels de l'essence étudiée et le poids surfacique des arbres (expression de la densité du peuplement).

Or des tests ont montré que pour une essence et une GRECO donnés, l'accroissement en surface terrière ($m^2/ha/an$) relié à l'âge donnait un nuage de points très large, dont la fertilité (hauteur dominante) ne semble rien expliquer. En revanche, le taux annuel d'accroissement en surface terrière ($\Delta G/G$) montre pour toutes les essences une courbe décroissante assez nette. La part expliquée (r^2) est de 40 à 50%, mais ni la GRECO, ni la hauteur dominante, ni la surface terrière totale du peuplement ne semblent discriminants pour la part restante :

- les recherches AFI sur les dispositifs et le projet ASKAFOR tendent à montrer une relation positive entre accroissement et capital dans les futaies structurées (itinéraire-projet), ainsi que la faible influence de la fertilité, qui baisse avec l'âge du peuplement selon des travaux déjà anciens (AFI 2020) ;
- à un âge donné le capital d'une futaie régulière dépend de la fertilité, donc outre les régimes d'éclaircie les diagrammes de points âge/taux combinent des capitaux très différents : dans les peuplements denses le nombre d'arbres compense le faible accroissement individuel, tandis que l'inverse se produit dans les peuplements clairs.

- enfin l'étalement des points pourrait également être influencé par d'autres facteurs écologiques (variations climatiques interannuelles, vigueur des arbres et proportion de houppier vert, essences secondaires, âge du sol forestier) mais aussi méthodologiques (faible taille des placettes IGN, caractère relatif du « poids » attribué aux arbres). Il est même possible que le climat soit le facteur déterminant dans les 50 à 60% non expliqués.

Enfin ces phénomènes affectent les arbres et les peuplements de manière très différenciée, avec une grande variabilité individuelle, que les calculs et indicateurs de moyenne « non qualifiés » (sans indications sur leur variabilité) masquent complètement. D'où l'intérêt d'un suivi « ex-post » de la réalité de l'accroissement, de la mortalité, des prélèvements et des « entrées » (passage à la futaie), pour déterminer des stocks additionnels de carbone réels et crédibles, plutôt que d'utiliser des rabais trop importants et des projections hasardeuses.

Dans l'approche estimative *ex-ante*, on a retenu pour chaque essence la courbe moyenne $\%AccrG=f(\text{âge})$. Les taux constatés sur les dispositifs AFI sont la plupart du temps supérieurs, ce qui peut s'expliquer par un capital et une utilisation de l'espace vertical optimisés, mais aussi peut-être par le choix des peuplements (vigoureux sur bonnes station) et la sélection progressive des arbres selon leur vigueur. Pour rester fidèle aux données IGN et rester prudents nous n'avons pas remonté les courbes. Toutefois, l'itinéraire-projet suivant les principes sylvicoles de l'AFI, nous avons fixé un taux-plancher au-delà de 50 à 150 ans selon l'essence, restant en-dessous des taux constatés sur les dispositifs AFI, les variables dendrométriques ne faisant que « nuancer » les effets.

L'utilisation de cette courbe de taux implique une production volumique reliée au capital sur pied, ce qui peut être contre-intuitif au regard de la Loi d'Eichhorn. Mais cette loi a une validité restreinte et a été amendée plusieurs fois au XX^e siècle. Depuis Assmann en 1954, on sait que pour une combinaison essence/âge/station, la production n'est stable que pour des peuplements ni trop ni trop peu éclaircis (Pardé & Bouchon 1988). Ainsi, une sylviculture menant la surface terrière après coupe à 50% de celle d'un itinéraire très conservateur (peuplement fermé) entraîne une perte de production totale de l'ordre de 35%. L'accroissement serait inférieur au taux du peuplement « normal » pour des peuplements très clairs ou très denses. Mais ces situations de sous- et sur-capital sont exclues par la méthode.

On notera aussi que les productions brutes obtenues sont en général un peu inférieures aux moyennes renseignées par l'IGN à essence et âge égaux, donc il est peu probable que nos modèles ne surestiment le stockage dans la biomasse des arbres.

3.2.5. Evolution de la biomasse vivante totale des arbres

Pour le cubage du volume total des arbres, on peut utiliser :

- des volumes bois fort tige utilisant des facteurs de forme (formule $V=FGH$ avec estimation de F ou tarifs de cubage), auxquels sont rajoutés le volume des racines et des branches par des coefficients d'expansion ;
- ou encore des volumes aériens totaux par formules allométriques, auquel sont rajoutés les volumes des racines.

En 2004 le rapport Carbofor (Loustau et al., 2004) recommandait déjà l'utilisation de formules allométriques pour estimer le volume total de la biomasse aérienne, plutôt que d'avoir recours à une méthode « simplificatrice » utilisant des facteurs d'expansion branches moyens ne variant pas avec l'essence et l'âge des arbres. Confirmant cette position, pour la construction de méthodes LBC le rapport Climafor (Gleizes 2017) déconseille d'avoir recours à ces facteurs d'expansion branches moyens. Ainsi, que l'on utilise des formules allométriques de volume aérien total ou des coefficients d'expansion branches, les formules utilisées doivent varier au minimum avec l'essence et l'âge des arbres. Elles doivent être construites sur un échantillon très large et tenir compte d'un maximum de facteurs de variation de la forme des arbres.

Le protocole « Emerge » (Deleuze et al 2014) donne à partir d'une base de données très importante une formule de cubage aérien total (tronc + branches) par essence et selon l'âge pour 10 essences feuillues et 18 essences résineuses, à partir du diamètre et de la hauteur totale de l'arbre. Les formules intègrent ainsi les facteurs de forme de la tige et d'expansion branches. Dans les futaies résineuses régulières et les taillis simples on peut supposer que la sylviculture influence peu l'expansion des branches. En revanche, utiliser cette règle pour les futaies irrégulières et les taillis-sous-futaie feuillus pourrait entraîner plus d'approximations.

Pour les racines, Climafor (2017) conseille d'utiliser les moyennes de 1,28 pour les feuillus et 1,30 pour les résineux, ou d'utiliser l'équation de Cairns et al. (1997) établie par méta-analyse et reliée à la biomasse aérienne, donc variant avec l'essence et l'âge. Pour être plus précis dans l'estimation, nous faisons le choix d'utiliser les équations de Cairns pour la zone tempérée.

Ainsi, la biomasse totale sera estimée par :

Bv = Volume aérien Emerge (essence, surface terrière, hauteur) + volume racinaire de Cairns (selon Bv_a)

Par souci de cohérence nous retenons ce choix pour la biomasse des arbres tant initiale, que pour l'estimation de l'évolution des stocks avant projet et pour les constats *ex-post*.

Comme expliqué au paragraphe 3.2.2, la biomasse totale de chaque arbre sera estimée par le volume Emerge et les équations de Cairns, soit :

$$Bv = Bv.a + Bv.ra$$

Avec : Bv.a = Biomasse aérienne totale = volume Emerge selon essence (surface terrière, hauteur)

Où : Bv.ra = Biomasse racinaire selon Cairns = $\exp [-1,0587 + 0,8836 \times \ln(Bv.a) + 0,2840]$

Par régression linéaire, les placettes IGN sélectionnées ont permis de déterminer des volumes totaux à partir de la surface terrière totale et de la hauteur moyenne du peuplement par essence.

Le modèle de production prévoit ensuite que à t₀, le peuplement est sur pied (veille de la coupe rase) et à t₁ la coupe rase soit effective pour le scénario de référence (la séquestration en forêt est donc nulle, avec un stockage dans les produits bois), puis un reboisement est fait à l'année 2.

Pour l'itinéraire projet, afin d'éviter des surestimations, les pratiques de sylvicultures sont encadrées avec des prélèvements maximums autorisés pour les différentes éclaircies pendant les 30 ans du projet, ainsi qu'une surface terrière minimale en fin de projet pour le scénario irrégularisation.

3.3. Biomasse du sous-étage (B_{vs})

Ce compartiment représente de l'ordre de 4 % du stock de carbone de l'écosystème forestier donc peut difficilement être négligé. Les valeurs publiées varieraient de 1 tC/ha dans les pineraies landaises à 2,5 tC/ha dans les peupleraies et 6,5 tC/ha pour les résineux (Loustau 2004). Selon Gleizes (2017), en l'état actuel des connaissances, on peut utiliser un stock moyen de 2,4 tC/ha pour les feuillus et 6,5 tC/ha pour les résineux. Toutefois cette différence moyenne entre feuillus et résineux cache des écarts-types importants, puisque les peuplements concernés peuvent avoir des sous-étages nuls (jeune futaie dense) à très développés (futaie âgée claire).

Il semble préférable de faire varier ce stock entre 1 et 6 tC/ha selon le développement du sous-étage. Ainsi pour la valeur initiale du stock on fixera, selon le sous-étage décrit par le porteur de projet :

5 tCO₂/ha : couverture totale (strate herbacée + strate arbustive) < 30%

- 10 tCO₂/ha : couverture totale entre 30 et 60%
- 15 tCO₂/ha : couverture totale entre 60 et 100%
- 20 tCO₂/ha : couverture > 100% (strates herbacées et arbustives complètes se superposant partiellement).

Estimer l'évolution de ce stock demande de connaître le flux net de carbone dans ce compartiment. Le sous-étage se développera grâce à la mise en lumière par la coupe rase ou les éclaircies. Par ailleurs, ce stock est renouvelé assez rapidement (1-5 ans pour la strate herbacée, 10-15 ans maximum pour la strate arbustive hors essences arborescentes).

Les peuplements éligibles à cette méthode étant relativement jeunes et avec des couverts fermés, le sous-étage se développera avec les éclaircies successives. Les stocks élevés constatés dans les forêts étagées et matures mettent longtemps pour se constituer après la phase de compétition (couvert fermé), donc dans cette phase d'ouverture le puits annuel net peut être estimé à 0,20 tC/ha/an soit 0,73 tCO₂/ha/an. Pour utiliser une valeur moyenne avec une marge de sécurité, nous retenons 0,33 tCO₂/ha/an pour toute la durée de l'itinéraire projet. Pour l'itinéraire de référence, on supposera une annulation temporaire du stock et du flux après la coupe rase, le stock se reconstituant après coupe par ce flux moyen pour arriver à 3 tC/ha à 30 ans. Ce stock dépend bien sûr des essences plantées et des modalités de dégagement, et se réduira après la fermeture du couvert 20 à 30 ans après la coupe. Toutefois, nous utiliserons ces règles sans aller plus loin étant donné les incertitudes et le faible poids de ce compartiment.

3.4. Biomasse Morte (Bm)

Si l'impact des mortalités n'a pas été intégré dans d'autres méthodes, ou par le seul jeu de rabais parfois arbitraires, la hausse indéniable des mortalités en Europe et en France (Senf et al 2018, Taccoen 2019) impose de prendre en compte l'impact de ce facteur sur le stockage du carbone en forêt.

La **mortalité des arbres** s'exprime généralement en pourcentage de la biomasse sur pied et dépend de nombreux facteurs :

- l'essence considérée avec son adaptation à la station (besoins hydriques et minéraux), sa résistance face aux stress et ses capacités de résilience ;
- la vulnérabilité de l'arbre influencée par sa génétique, son âge, ses antécédents de stress, la compétition exercée par les voisins directs, la prédation (ex. cervidés) et les liens fonctionnels entre individus pouvant améliorer sa résilience ;
- les aléas subis (stress hydrique, choc thermique, attaque de pathogène ou ravageur, vent, feu...).

La méthode s'appliquant à des forêts activement gérées, la récolte de l'essentiel des bois dépérissant donnera au compartiment bois mort un rôle relativement faible dans l'additionnalité potentielle du projet. Toutefois, la hausse probable de la mortalité avec le changement climatique doit être intégrée dans l'évolution de la production nette (brute – mortalité) et dans les produits générés. Sauf à maintenir activement une partie du bois mort sur pied et/ou au sol en forêt, un parti pris de gestion fort, gage d'une meilleure fonctionnalité écologique globale du système. Ce point fera l'objet d'une évaluation dans la partie « cobénéfices » de la méthode.

La mortalité en % du volume sur pied est fixée à 0,5% au début du projet, avec une hausse annuelle de ce taux de 2% ($M_n = 1,02 \times M_{n-1}$), soit 0,90% par an après 30 ans. Ce taux est très largement supérieur aux taux moyens utilisés dans la Stratégie Nationale Bas Carbone, qui ne dépassent pas 0,60% en 2050.

A cela s'ajoute deux cas particuliers pris en compte dans le calculateur, dans un objectif de rester conservateur dans l'estimation :

- Pour la régénération naturelle, lorsqu'elle est simulée dans les scénarios projets (scénarios sur régénération acquise et irrégularisation), la mortalité naturelle est également appliquée aux semis à partir de leur date d'apparition. Leur évolution suit ensuite la même courbe de production définie pour les arbres matures.
- Pour les scénarios de référence en taillis feuillus, qui sont susceptibles d'avoir une coupe rase avant les 30 ans (cas du robinier et châtaignier), le facteur de mortalité est également pris en compte pour comprendre les souches qui ne pourraient pas toutes recéper ou l'épuisement de leurs capacités à rejeter.

Stock de bois mort :

Le stock de bois mort initial estimé grâce aux mesures du porteur de projet (Bm_0) évolue chaque année avec la mortalité, les prélèvements et les pertes par décomposition :

Stock bois mort année $n = (\text{Stock année } n-1 + \text{apport par mortalité année } n - \text{récolte année } n) / (1 - 1/DD)$

Soit : $Bm_n = (Bm_{n-1} + M_n \times Bv_n) / (1 - DD)$

Pour la durée moyenne de décomposition du bois mort (DD) on prendra les valeurs suivantes (du Bus de Warnaffe et al 2024) :

Essence(s)	Bm-Tige/Racines	Branches coupées
Hêtre	15	7
Châtaignier	30	10
Chêne pédonculé et rouvre	40	20
Chêne pubescent et vert	30	15
Épicéas et sapin	30	10
Mélèze d'Europe, douglas, cèdre	40	12
Pin d'Alep	20	7
Pins laricio, noir, maritime, sylvestre	30	10
Robiner faux-acacia	40	12

Pour les peuplements mélangés, les taux de décomposition variant par essence, on fera une moyenne des DD Bm tige/racines rapportées à leur part en surface terrière dans le peuplement. Pour passer à une biomasse morte initiale, on utilisera en fonction des mélanges une infradensité moyenne résineux, feuillus ou globale. De plus, le volume bois mort renseigné par le porteur de projet est un volume global (les mesures seront précisées dans une notice d'utilisation de la méthode et du calculateur).

La mortalité annuelle alimente chaque année le compartiment du bois mort, mais on supposera que les apports du bois mort par les coupes (pertes d'exploitation aériennes et racinaires) ne se feront qu'à chaque éclaircie.

Pour la récolte du bois mort lors des coupes :

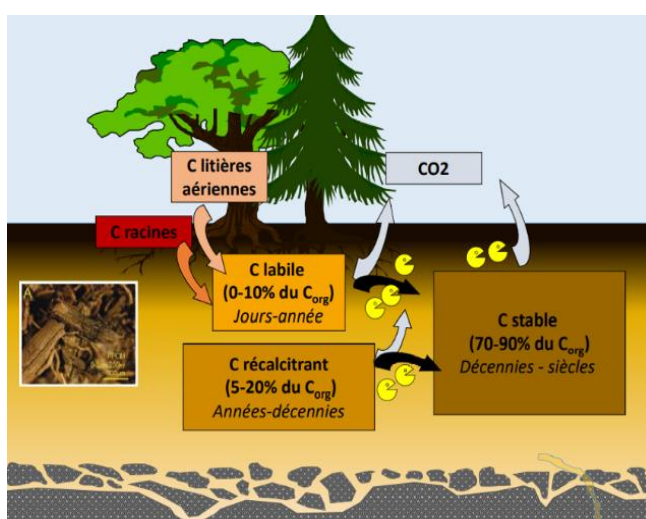
- Pour le scénario de référence, on supposera une récolte de 80% en coupe rase et de 50% à chaque éclaircie sur le stock Tige en feuillus et résineux (mortes naturellement) et 70 % sur le stock branches en feuillus (30% de branches coupées non prélevées).
- Pour le scénario de projet, les pourcentages de récolte à chaque éclaircie seront donnés par le porteur de projet.

3.5. Carbone du sol (S)

3.5.1. Approche globale

À l'échelle mondiale, les sols forestiers contiennent de 50 à 80 % de la quantité totale de carbone stockée dans les sols du monde, et en forêts tempérées le stock de carbone est généralement plus élevé dans les sols que dans la biomasse (Inra, 2016 in Climafor). Ce compartiment est central pour les méthodes LBC puisqu'en France le sol et la litière représentent 57 % du carbone des forêts (Dupouey et al 2000 et 2001), ce qui signifie qu'en moyenne le stock de carbone du sol représente 1,32 fois celui de la biomasse.

Les évolutions de ce stock peuvent donc être déterminantes pour le rôle d'atténuation climatique des forêts et surtout pour éviter qu'elles deviennent des sources de CO₂ au lieu de puits. En effet les changements d'usages ou de pratiques ainsi que les variations climatiques peuvent fortement modifier les stocks (GIS Sol, 2011). Or parmi les calculateurs analysés par Climafor (Gleizes 2017), beaucoup n'estiment pas les variations de stock dans le sol.



Source : Renecofo

Les flux entrants de carbone dans le compartiment des sols sont constitués par la décomposition de la litière aérienne (feuilles, branches...) et de la biomasse souterraine (racines) et par les exsudats racinaires. Si la décomposition de la litière aérienne est relativement bien estimée, ce n'est pas le cas pour les apports racinaires. Une couverture arborescente continue devrait favoriser l'intégration au sol du carbone végétal. Mais les dynamiques du carbone dans le sol sont très longues, de sorte qu'à ce stade des connaissances, on ne peut chiffrer que l'effet de pratiques très caractérisées (Augusto et al 2019).

3.5.2. Stock initial

Les estimations de stock divergent : en France, il représenterait en moyenne 300 t-eqCO₂/ha sur le premier mètre (Derrien 2018, Jonard et al 2019) et 610 t-eqCO₂/ha en tout (Martel et al 2017 in EFSE 2019). Si le stock au-delà de 1m peut être important, on peut ainsi considérer qu'il est très stable. Nous nous concentrerons ainsi sur une profondeur de 100cm sous la litière.

Les valeurs moyenne des stocks actuels de carbone dans les sols forestiers de France révélées par la littérature sont relativement cohérentes :

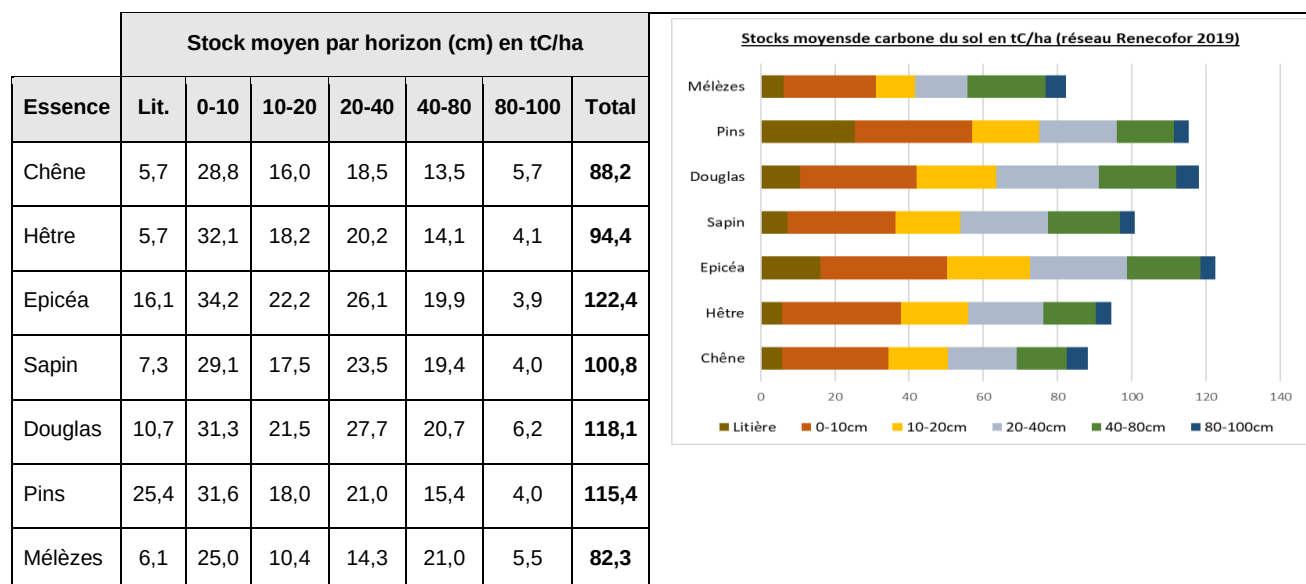
Référence	Unité	Litière	0-10cm	10-20cm	20-30cm	30-40cm
Pignard et al., 2000 *	%	9%	40%	23%	14%	14%

	tC/ha	8,3	72	12,9
Arrouays et al 2002	tC/ha	-	70	-
Citepa (Madignier et al., 2015)	tC/ha	-	73	-
GIS Sol cité dans ADEME, 2014	tC/ha	-	80	-

* Réseau systématique de suivi des dommages (6 000 placettes depuis 1988 dans 35 pays européens dont 557 en France)

Les travaux du GIS Sol fournissent des valeurs de la teneur en carbone des sols forestiers par ancienne région administrative à partir des données RMQS (réseau de mesures de la qualité des sols), mais Climafor (Gleizes 2017) déconseille d'utiliser ces données qui lui paraissent instables.

Avec 102 placettes permanentes en France depuis 1992, le réseau national RENECOFOR donne des chiffres moyens par essence dominante du peuplement (Jonard et al 2017, Jonard et al 2019)



Dans ce réseau, il apparaît que le stock total moyen est significativement plus élevé en résineux (109,5 tC/ha) qu'en feuillus (88,5 tC/ha). Toutefois l'échantillon utilisé n'est pas vraiment représentatif des forêts françaises : les sols acides et les futaies adultes du Nord sont surreprésentés (Pignard et al., 2000), et le réseau est constitué de forêts publiques relativement âgées avec très peu de forêts méditerranéennes (Jonard et al 2017). Mais ce réseau permet d'identifier les facteurs influents en France : le type de sol ne semble pas déterminant tandis que l'âge du peuplement a un impact et qu'il existe une différence entre feuillus et résineux, surtout marquée pour la litière. En effet comme le signale Gleizes (2017), de nombreux travaux montrent que les sols de forêts de résineux ont tendance à stocker davantage de carbone que ceux des forêts de feuillus et ce, essentiellement dans la litière et les horizons superficiels. Avec une méta-analyse de 77 études dans 28 pays, Boca et al. (2014) montrent que le carbone organique des sols est 14 % plus élevé sous des conifères que sous des feuillus, avec 38 % de plus dans la litière. Cependant, Climafor estime que « il ne paraît pas possible, en l'état des connaissances, d'isoler une valeur pour les feuillus et pour les résineux, et encore moins par type d'essence », et conseille de retenir la valeur moyenne. Enfin, les stocks sont généralement plus élevés dans les sols limoneux et argileux que dans les sols sableux en raison du complexe argilo-humique, mais il serait difficile d'intégrer ce facteur dans la méthode.

Considérant l'analyse ci-dessus, **pour la partie litière + 0-40cm du sol (impactée par les pratiques) nous retiendrons un stock moyen de 330 tCO₂/ha en résineux et 300 tCO₂/ha en feuillus.**

3.5.3. Variations de stock sur 30 ans

Flux annuel sous couvert (itinéraire projet)

Les variations de stock résultent du bilan net entre apports par décomposition des végétaux (feuilles, rameaux, bois morts, rémanents de coupe, exsudats racinaires) et minéralisation de la matière organique par respiration. Pour simuler ces variations selon les facteurs du milieu, l'idéal est de pouvoir construire des « fonctions de transfert » entre biomasse morte, sol et atmosphère. Le modèle prédictif Yasso07 (Zhun et al 2019) est probablement le plus avancé pour chiffrer cette évolution, mais reste difficile à appliquer dans un cas précis et pour une méthode LBC. Un modèle carbone « PROCESS » intégrant un module Sol devrait être réalisé en 2024 par une équipe du CEFE Montpellier sous financement ANR, avec un module Changement Climatique (effet cavitation) nommé « Sureau ». Mais à ce stade, il ne semble pas possible d'intégrer de tels modèles mécanistes dans le cadre d'une méthode LBC. Nous partons donc sur une approche empirique.

Les sols forestiers de France continuent à jouer un rôle de puits (Jonard et al 2019), mais le flux net selon le type de peuplement et les pratiques est difficile à établir. Toutefois le stockage devrait à priori atteindre un plafond, lorsque le stockage du volume ligneux vivant plafonnera comme expliqué plus haut. Ainsi le stock évoluera selon l'équation suivante :

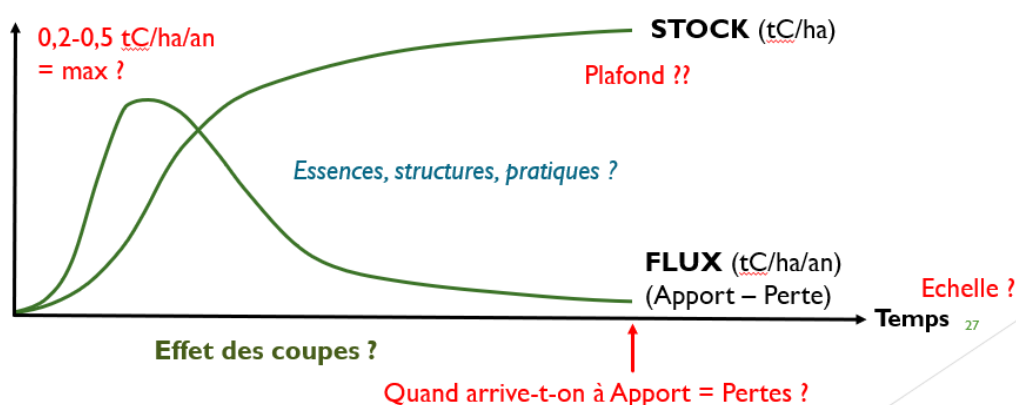
$$S_n = S_0 \times \exp(-n/T) + T_s \times A_s \times [1 - \exp(-n/T)]$$

Où : S_0 = stock initial ; T_s = constante de renouvellement du carbone du sol

A_s = stockage annuel brut de carbone dans le sol.

S'il est possible d'approximer S_0 comme expliqué plus haut, il est très difficile de fixer le temps de résidence global du carbone dans le sol (T_s) et le stockage annuel brut (A_s). 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.

Quand elles intègrent le compartiment sol, les méthodes actuelles d'estimation utilisent un stockage annuel moyen fixe dans le temps et pour tous les peuplements. Or à long terme, le stockage annuel devrait évoluer vers un flux nul (apports = pertes), qui arriverait plus ou moins vite selon l'écosystème et les pratiques. Selon M. Jonnard (com. orale), depuis la plantation le flux net augmenterait vite au début jusqu'à un maximum, puis descendrait lentement après le pic (courbe de type « Ovington »).



Selon ce chercheur, le flux annuel nul arriverait plus tard dans une forêt irrégulière (sans coupe rase) qu'une futaie régulière, et encore plus tard dans une forêt en libre évolution. Mais à court et moyen termes les variations sous couvert sont relativement faibles et nous manquons d'éléments pour estimer

la variation éventuelle de flux sur une fenêtre de 30 ans. Vu l'état actuel des connaissances sur les écosystèmes forestiers français, à ce stade et pour cette méthode nous ne ferons pas de différence entre les flux entrants sous couvert selon les essences et les modalités de coupe.

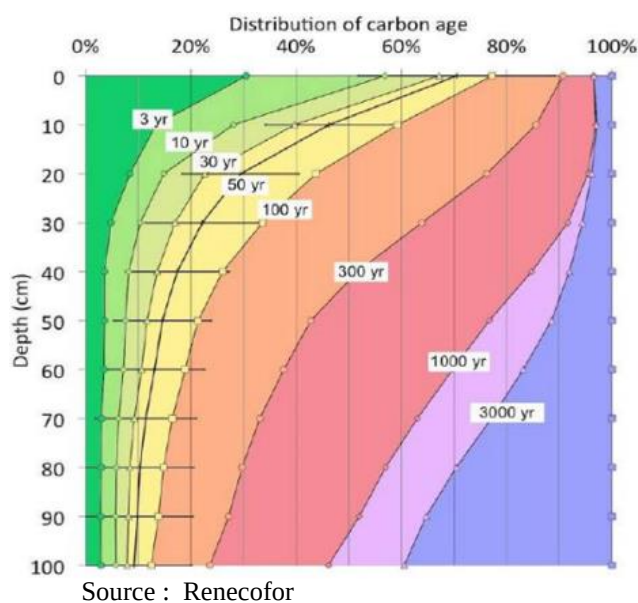
Seule une partie des apports de litière est intégrée au sol et une partie du stock se minéralise chaque année. Il en résulte une séquestration nette totale du sol estimée à 0,35 tC/ha/an en moyenne dans le réseau Renecofor soit 1,28 tCO₂/ha/an (Jonard et al 2017 et 2019), ce qui représente 0,4% du stock (4 pour 1000). En Allemagne cette moyenne a été estimée à 0,41 tC/ha/an à partir d'un réseau de 1800 placettes (Grüneberg et al. 2014). Compte-tenu des caractéristiques des deux forêts nationales, ces chiffres sont tout à fait cohérents. A titre de comparaison, en France le stockage annuel moyen est estimé à 0,05 tC/ha/an pour les prairies, 0,39 tC/ha/an pour les landes et les estives et -0,17 tC/ha/an pour les cultures labourées (sources de CO₂) (FAO 2014, INRA 2016).

Le réseau Renecofor fait apparaître un stockage annuel plus dynamique en résineux qu'en feuillus (0,49 pour 0,20 tC/ha), mais cette différence n'est pas significative (les effets âge et essence sont inséparables) et principalement marquée dans les horizons superficiels ; le réseau Renecofor a également montré un stockage annuel significativement supérieur en futaie irrégulière par rapport aux futaies régulières (Jonard et al 2017).

Nous avons retenu, pour les sols sous couvert arborescent, un stockage annuel moyen de carbone dans le premier mètre de 1,28 t-eqCO₂/ha donné par Jonard et al (2019), inférieur à la fourchette haute de 4 pour 1000 (1,54 t-eqCO₂/ha/an).

Effet de la coupe rase sur le stock (itinéraire de référence)

La litière est le compartiment du sol au stock de carbone le plus instable. En effet le degré de stabilité du carbone dans le sol est bien exprimé par le diagramme suivant donnant le profil des âges selon la profondeur (sources M.Jonnard) :



Les horizons superficiels représentent plus de la moitié du stock total de carbone du sol, donc des pratiques impactant leurs stocks peuvent avoir un effet important. Or selon la méta-analyse de Landmann et al (2023), reprenant 71 publications sur le sujet, la coupe rase provoque une perte moyenne de carbone organique de 28% dans l'horizon organique (litière) et 10% dans l'horizon organo-minéral (0-40cm). Ceci produit une perte totale estimée entre 5 et 7%, qui peut atteindre 20% en cas

de préparation mécanique des sols (selon le type de préparation). Pour cette méthode, pour tenir compte de la difficulté d'anticiper les modalités de préparation dans l'itinéraire de référence on retient par prudence une perte moyenne de stock de 15% en coupe rase avec plantation (scénarios de référence et d'allongement avec plantation). On considérera une perte de stock de 5% par la coupe définitive sur régénération acquise. En effet, même avec régénération naturelle la perte du couvert supérieur impacte le stock de carbone du sol, car le facteur majeur de minéralisation du carbone est la température, très influencée par la perte d'ambiance forestière.

Effet de la coupe rase sur le flux annuel

La suppression des arbres entraîne l'annulation des apports de litière sur une courte période, puis une lente remontée jusqu'à la couverture complète du sol par une végétation dense et stratifiée. Le flux est donc nul juste après la coupe rase (0,05 tC/ha/an pour les prairies à titre de comparaison), puis remonte progressivement. Nous supposons une évolution linéaire de 0 à 30 ans, calibrée par un flux nul à $t=0$ et un flux revenu à son niveau avant coupe à $t=30$.

3.6. Produits-Bois (Pb)

L'apport sera estimé par les produits-bois durables récoltés dans le scénario sylvicole considéré. L'évolution du stock de carbone dans les produits-bois résulte d'un flux annuel net égal à : Apports en produits durables moins – Pertes par combustion et décomposition (voir plus haut). Il faut donc définir des volumes annuels d'apports et de pertes en matière de produits-bois durable.

A noter que dans la plupart des cas (diagnostics des qualités établis sur pied puis vente en bloc et sur pied sans connaissance des tris réels), l'estimation des produits-bois constitutifs du capital sur pied et/ou des coupes sera faite visuellement, ce qui correspond à des qualités supposées. Dans le cas de suivi de vente triées par qualités effective, cette estimation sera affinée, amenant moins d'incertitude sur le stockage produits (d'autant plus qu'il s'agira de produits réellement mis sur le marché).

3.6.1. Volumes de produits récoltés

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, des branches et de la biomasse morte naturellement ;
- la part de bois durable récolté et des durées de vie des produits associés.

Les volumes récoltés par une coupe sont ainsi :

$$\begin{aligned} R &= \text{Récolte tige (R.ft)} + \text{Récolte branches (R.br)} + \text{Récolte bois mort (R.M)} \\ &= \%R.ft \times B.ft + \%R.br \times B.br + \%R.M \times B.m. \end{aligned}$$

Où %R sont les taux de récolte dans la tige (%R.ft), les branches (%R.br) et le bois mort (%R.M).

Seuls les bois récoltés dans la tige génèrent des usages durables (à la très rare exception de panneaux et isolants fabriqués par trituration des branches, réintégrés ci-dessous). Or en estimant le volume aérien total, le volume Emerge ne donne pas le volume bois fort tige, nécessaire pour l'estimation des produits à longue durée de vie. Il donc nécessaire d'estimer le volume bois fort tige (B.ft) à partir du volume total aérien donné par les formules Emerge (Bv.a). Pour ce faire, on établit le rapport $Bv.ft$ (IGN) / $Bv.a$ (Emerge) selon l'âge pour chaque essence. Ceci permet d'estimer le volume bois fort tige récolté par des coupes sur toute la période de 30 ans. Le volume Bft obtenu sera alors ventilé selon les différents produits possibles, auxquels seront affectés des durées de vie moyenne dans la filière actuelle (Gleizes 2017).

Pour éviter une surestimation et conserver une approche prudente, on considérera que :

1) Vu la durée moyenne de stockage du carbone dans le bois-énergie (1 an) et dans le papier et les cartons (2 ans), les bois récoltés pour ces usages sont généralement exclus du stock de carbone dès la récolte (Gleizes 2017). Il reste alors à estimer le stock de carbone généré par les autres produits.

2) Le bois récolté dans les branches et le bois mort ne génèrent pas de produits durables. Il reste ainsi à estimer le stockage durable dans le bois issu de la tige. Celui-ci est le résultat du produit suivant :

Volume récolté façonné en dimensions permettant un usage durable (grumes ou billons)
x Rendements de transformation jusqu'au produit final (effectivement durable).

Le volume récolté façonné en dimensions permettant un usage durable est le volume tige récolté (R.ft) multiplié par la part du produit bois potentiel identifié par le porteur de projet (% de sciage construction, % de panneaux, % de piquets/rondins/poteaux, % de palette et % de BIBE). Si comme expliqué plus haut, le gestionnaire forestier n'est pas en capacité de maîtriser le devenir final des bois après leur mise en vente, il a en général connaissance des produits potentiels par l'estimation des qualités sur pied et le façonnage des bois. De plus il n'est pas possible d'estimer le stock de carbone dans les produits sans ventiler la récolte par destination. Nous prendrons donc les estimations de produits générés fournies par le gestionnaire.

Pour l'estimation ex-post :

Si le porteur de projet suit bien les produits réalisés sur les coupes, l'ensemble (R.ft x %BO-tige x %.Valo-BO) pourra être remplacé par le volume effectivement façonné pour un usage bois d'œuvre. A défaut, le bois durable généré devra être estimé par les volumes totaux récoltés (R.ft) et le protocole d'estimation avant projet.

3.6.2. Stock de carbone généré

Si R.BO est le volume de Bo récolté et T le taux de transformation de la filière (volume de produit durable / volume BO récolté), DV la durée moyenne de vie des produits-bois (DV = Demi-vie / ln.2) :

Le stock de produits-bois durable généré par une coupe est : $P_b(t) = R.BO \times T$

Et le stock évolue alors comme suit : $P_{b_n} = [P_{b_{n-1}} + P_b(t)] \times (1 - 1/DV)$

En estimation avant projet comme en ex-post, le taux de transformation est fixé à 50 % en construction/palette (sciage), 90 % en panneaux et piquets/poteaux et 100 % en BIBE.

Le taux de rendement en seconde transformation est de l'ordre de 80%, plus 5% pour considérer l'usage en construction d'une partie des connexes soit 85% (2,4 Mm³/an de connexes sont recyclées en panneaux selon FCBA 2022). En effet selon FBCA (2022), sur 1 m³ de grume sur écorce, le rendement moyen de première transformation est en France de 41 à 58% (selon essence). On suppose des pertes de 10 à 30% en seconde transformation ce qui est probablement sous-estimé (surlongueurs et délignage, dégauchissage, assemblages, rabotage et ponçages ...)

Pour l'estimation ex-ante, on intègre également le taux de valorisation du bois d'œuvre potentiel (identifié sur pied) car des pertes sont réalisées lors du billonnage des arbres.

La durée moyenne de vie des produits à longue durée (construction-ameublement) est en France de 14 à 72 ans selon les produits (France Stratégie N°124, juillet 2023). Gleizes (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. Pour simplifier et étant donné la décision ci-dessous pour les panneaux, on retiendra seulement le BO avec une durée moyenne de vie de 50 ans.

Pour le calculateur, nous considérons que les coupes prévues à l'année n ont lieu avant l'accroissement du peuplement et la mortalité (Volume prélevé = $G_{ha}(n-1) \times \text{prélèvement}$), tandis que le volume qui reste sur pied s'accroît et subi la mortalité naturelle.

Pour éviter toute surestimation de l'opérateur, le calculateur encadre pourcentages de BO récoltés qui ne pourront dépasser :

- Douglas, Epicéas, Sapins : 80% à 50 ans et 90% au-delà ;
- Autres résineux et châtaignier : 70% à 60 ans et 80% au-delà ;
- Autres feuillus : 60% à 80 ans et 70% au-delà.

Dans les scénarios de référence, les pourcentage du volume récolté par catégorie de bois ont été définis par défaut.

3.7. Contenu en carbone du bois

Pour exprimer les stocks et les flux en tonnes de carbone, il est nécessaire de passer par l'infradensité (tonne de matière sèche / m³ de bois) et par le taux de carbone (% de carbone dans la matière sèche).

L'écorce étant moins dense que le bois, l'infradensité varie avec plusieurs paramètres tels que l'essence, l'âge, la largeur de cerne ou la position dans l'arbre. GIEC (2003) et Gleizes (2017) recommandent d'utiliser une valeur unique par essence. Toutefois, on constate que ces deux références montrent entre elles des écarts de -10 à +17%. Les valeurs étant assez différentes selon les essences, on retiendra les infradensités préconisées par les méthodes LBC actuelles et mises à jour grâce au projet XyloDensMap (Kerfriden et al. 2020) :

Essence résineuse	Infradensité	Essence feuillue	Infradensité
Douglas	0,46	Chêne pédonculé *	0,63
Pin maritime	0,44	Chêne sessile *	0,65
Pin sylvestre	0,46	Chêne pubescent	0,72
Pins laricio de Corse	0,49	Chêne vert	0,86
Pin noir d'Autriche	0,52	Hêtre	0,56
Sapin pectiné	0,42	Châtaignier	0,51
Epicéa commun	0,39	Robinier faux-acacia	0,64
Mélèzes d'Europe Alpes	0,50		
Epicéa de Sitka	0,40		

Pour le taux de carbone du bois, les références européennes distinguant feuillus et résineux vont de 45 à 52% selon les essences (résineux/feuillus) et les pays (Gleizes 2017). Malgré un léger avantage aux résineux, les tendances de ces deux groupes ne sont pas cohérentes. Ainsi, Carbofor (2004), INRA (2016) et Gleizes (2017) conseillent d'utiliser la moyenne de 0,475 tC/tMS.

Ensuite, pour passer de tC à tCO₂ il suffit de multiplier par 3,67 (rapport de masse molaire CO₂/C).

4. Intégration des paramètres des scénarios sylvicoles

Pour le scénario de Référence, les coupes sont définies par une opération de coupe rase à l'année 1 et au moins une éclaircie sur la période de 30 ans pour les essences concernées (Douglas, Pin maritime..). Par exemple, 2 éclaircies sont prévues en fin de période dans les peuplements de douglas

sur bonne station. Pour simplifier le process et réduire le risque de sous-estimation du scénario de référence, les itinéraires techniques ont été définis dans le calculateur et aucune adaptation ne peut être faite par le porteur de projet.

La durée de révolution des taillis a été fixée à :

- Chêne pubescent 40 ans
- Autres chênes 50 ans
- Robinier/Châtaignier 25 ans
- Hêtre 40 ans

Pour plus de détails sur le scénario de référence, on lira le texte principal de la Méthode.

Pour le scénario Projet, le porteur de projet renseignera chaque coupe prévue puis réalisée en année et taux de prélèvement en % de la surface terrière (= %R.ft), en distinguant par essence en cas de mélange. Ces informations permettront d'alimenter le modèle pour construire la simulation avant démarrage du projet. Il renseignera les pourcentages par catégorie de bois attendue lors des prélèvements.

Pour la récolte des branches et du bois mort, compte-tenu des besoins pour la préparation du terrain avant plantation et de place pour le rejet sur souche, on pose les hypothèses suivantes :

Coupe	Essences	Scénario(s)	Branches coupées (1)	Bois mort Tige (2)
Eclaircie	Résineux	Projet + Référence	0%	Scénario référence : 50 % Scénario projet : Entré par le PP
	Feuillus	Projet	Entré par le PP	Entré par le PP
Coupe rase	Résineux	Référence	0%	80%
	Feuillus	Référence	70%	80%

(1) Prélèvements lors des coupes.

(2) Prélèvement lors des coupes du bois mort l'année précédant celles-ci.

La régénération des peuplements est intégrée dans le calculateur à partir de :

- t=25 pour les scénarios avec régénération naturelle, sans chute du sous-étage
- t=30 pour le scénario avec régénération artificielle, avec chute du sous-étage et du sol.

La régénération est calculée à partir des modèles définis avec les données IFN (assimilée à une plantation en plein), ce compartiment de séquestration est donc assez faible sur les premières années. Dans le cas des peuplements mélangés, on considère que la régénération est composée de la même diversification et proportion que le peuplement principal.

Pour les scénarios d'allongement de cycle, l'itinéraire projet prend en compte la coupe rase ou coupe définitive à n=30, ce qui permet de ne pas surestimer le gain carbone dû au report de coupe.

5. Synthèse opérationnelle

Considérant ce qui précède, on résume les hypothèses posées comme suit :

Compartiment	Stock initial	Gain annuel	Pertes
Biomasse vivante des arbres	Emerge + Cairns avec les mesures initiales	Emerge + Cairns avec : $H_{tot} = f(\text{âge})$ selon essence/Greco $\% \text{Accr.G} = f(\text{âge})$ selon essence	Mortalité (cfr ligne 2) Récottes Tige, Branches, Bois mort (§ 4)
Bois mort	Estimé avec les données du porteur de projet	Mortalité en % du volume vivant : $t=1 : 0,5\%$ $t=2 \text{ à } t=30 : \text{Chaque année} \times 1,02$ Moins le volume récolté (selon %) Branches coupées et volume tige mort récoltées à chaque éclaircie	Durée moyennes de vie voir § 3.4 Moyenne des essences par compartiment en cas de mélange
Sous-étage	Selon mesures du porteur de projet (5 à 20 10 tCO ₂ /ha)	Gain net moyen = 0,33 tCO ₂ /ha/an (effet de la mise en lumière)	100% du stock après coupe rase (Référence), puis reconstitution linéaire pour arriver à 10 tCO ₂ /ha à 30 ans
Sol	Résineux = 330 tCO ₂ /ha Feuillus = 300 tCO ₂ /ha	Sous couvert = 1,28 tCO ₂ /ha Après coupe rase = hausse linéaire de 0,05 à 1,28 tCO ₂ /ha en 30 ans	Perte de 15% du stock après coupe rase (Référence), puis restockage jusqu'à la valeur avant coupe
Produits	Null.	<u>Volume tige récolté</u> x % de chaque produit x Rendement des produits	Perte annuelle = Stock / DV Avec DV selon le produit bois.

Données PP :

A encoder par le porteur de projet selon qualité (diamètres, rectitude, branches ...), par défaut 30% en feuillus et 70% en résineux

Le fonctionnement du calculateur demande les entrées suivantes, par fournisseur des données :

Mesures et données du porteur de projet	Choix cadré du porteur de projet	Choisis par le Modèle
<u>Pour l'Eligibilité et l'estimation initiale :</u> GRECO Surfaces terrières en bois vivant (D>17,5cm sauf Méditerranée 12,5) : - G total par essence - G de l'essence principale dépassant le TE.mini en diamètre - G francs-pieds en sous-Méthode Taillis Hauteur dominante de l'essence principale	Classe de fertilité de l'essence (Ho/âge) Scénario de référence Itinéraire du scénario-projet <u>Facteurs de vigilance*</u> : alerte au porteur de projet sur le niveau de risque en fonction de sa zone : - Risque incendie (guide du niveau) - Exposition aux vents (guide du niveau) - Densité de cervidés (guide du niveau)	Itinéraire du scénario de référence Modèles de croissance Hypothèses de mortalité Demi-vies du bois mort Stockage dans le sol et le sous-étage Taux de BO dans la tige, taux de valorisation du BO, rendements de transformation et demi-vie

% classes Deperis Age (à minima fourchette de 20 ans) Volume initial de bois mort Produits sur pied : qualités par produits potentiels, initiales et à chaque éclaircie prévue et répartition attendue dans les différents produits bois potentiels Eclaircies prévues par le projet (année + %Tige-Branches-BoisMort) <u>En plus pour suivi/Audit :</u> Surfaces terrières et hauteurs ci-dessus G par classe de D (par essence) Indicateurs de co-bénéfices Régénération (% de surface, hauteur) Coupes réalisées (année et m³ par produit) Volume et état du bois mort	<i>* A ce stade non intégrés dans le calculateur (définir un guide du niveau et préciser en entrée la zone géographique du projet.</i>	Infradensité et taux de carbone du bois + Paramètres de substitution (coefficients, taux de remplacement effectif)
--	---	--

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Augusto L., Saint-André L., Derrien D., Pousse N. & Cécillon L. (2019) : Séquestration de carbone organique dans les sols forestiers – impacts de la gestion sylvicole. *Forêt-Entreprise* 245 : 62-66.
- Boca A., Van Miegroet H., Sbih M. & Messaadia H. (2014) : Forest overstory effect on soil organic carbon storage : a meta-analysis. *Soil Science Society of America Journal* 78 suppl. : 35-47.
- AFI (2020) : Valorisation de la base AFI (Association Futaie Irrégulière), Améliorer le capital producteur en mobilisant mieux tout en préservant plus. 142 pages, rédaction collective.
- Brunori A., Sdringola P., Dini F., Llarioni L., Nasini L., Regni L., Proietti P., Proietti S., Vitone A. & Pelleri F. (2017) : « Carbon balance and Life Cycle Assessment in an oak plantation for mined area reclamation ». *Journal of Cleaner Production* 144 (février): 69-78. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.116>.
- Cairns, M., Brown, S., Helmer, E. et al. 1997. Root biomass allocation in the world's upland forests. *Oecologia* 111 : 1–11. https://www.researchgate.net/publication/225488798_Root_biomass_allocation_in_the_world's_upland_forests
- Deleuze C., Morneau F., Constant T., Saint André L., Bouvet A., et al (2014) : Le projet EMERGE pour des tarifs cohérents de volumes et biomasses des essences forestières françaises métropolitaines. *Rendez-vous Techniques de l'ONF* 39-40, pages 32-36. <https://hal.science/hal-00934771>
- Derrien D. (2018) : Le carbone organique des sols forestiers, un stock en constante évolution. *Forêt-Entreprise* 242 : 44-48.
- Du Bus de Warnaffe G. & Angerand S. (2020) : Gestion forestière et changement climatique, une autre approche de la stratégie nationale d'atténuation. *Rapport d'étude des ONG Fern et Canopée*, 83 pages, janvier 2020.
- Du Bus de Warnaffe G. (2020) : Carbone et scénarios de prélèvement en France, une autre approche des stratégies nationales d'atténuation. *Forêt Méditerranéenne* XVI-4 : 355-360.
- Du Bus de Warnaffe G. (2023) : Pour une gestion forestière écologique, récolter du bois dans une forêt vivante. *Editions Terre Vivante*, 288 pages.
- Du Bus de Warnaffe et al (2024) : Annexe calculateur de la Méthode Bas-Carbone « Libre Evolution », en instruction.
- Dupouey J.L., Badeau V., Thimonier A., Dhôte J.F, Bergès L., Augusto L., Belkacem S. & Nys C. (2000) : Stocks et flux de carbone dans les forêts françaises. *Revue Forestière Française* LII : 139-154.
- EFESE (2019) : La séquestration de carbone par les écosystèmes en France ? Rapport d'évaluation, *Evaluation Française des Ecosystèmes et Services Ecosystémiques*, mars 2019.
- FAO (2014) : Agriculture, forestry and other land use emissions by sources and removals sinks : 1990-2011 analysis. *FAO statistics Division Working Paper*.
- FCBA (2022) : Memento 2022, disponible en ligne.
- Federici S., Tubiello F.N., Salvatore M., Jacobs H. & Schmidhuber J., 2015 : New estimates of CO2 forest emissions and removals: 1990-2015. *Forest Ecology and Management* 352 : 89-98.
- GIS Sol (2011) : Rapport sur l'état des sols de France présenté à Paris le 18 novembre 2011.
- Gleizes O (2017) : Faire un diagnostic carbone des forêts et des produits bois à l'échelle d'un territoire (étude de faisabilité Climafor). *Rapport final. ADEME*, 118 pages.
- Gleizes O. & Martel S. (2019) : Climafor, le nouvel outil de quantification du carbone du CNPF. *Forêt-Entreprise* 245, 75-76.

González-García S., Bonnesoeur V., Pizzi A., Feijoo G. & Teresa Moreira M. (2013) : « The influence of forest management systems on the environmental impacts for Douglas-fir production in France ». *Science of The Total Environment* 461-462 : 681-92. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.05.069>.

González-García, S., V. Bonnesoeur, A. Pizzi, G. Feijoo, et M.T. Moreira (2014) : « Comparing environmental impacts of different forest management scenarios for maritime pine biomass production in France ». *Journal of Cleaner Production* 64 : 356-67. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.07.040>.

Grüneberg E., Ziche D. & Wellbrock N. (2014) : Organic carbon stocks and sequestration rates of forest soils in Germany. *Global Change Biology* 20 : 2644-2662.

Hu Z., Michaletz S.T., Johnson D.J., McDowell N.G., Huang Z., Zhou X. & Xu C. (2018) : Traits drive global wood decomposition rates more than climate. *Global Change Biology* <https://doi.org/10.1111/gcb.14357>.

IGN (2022) : Memento, disponible en ligne.

Inra (2016) : Leviers forestiers en termes d'atténuation pour lutter contre le changement climatique aux horizons 2020, 2030, 2050 (Rapport d'étude), 96p.

Jonard M., Nicolas M., Coomes D., Caignet I., Saenger A. & Ponette Q. (2017) : Forest soils in France are sequestering substantial amount of carbon. *Science of the Total Environment* 574 : 616-628.

Jonard M., Nicolas M., Coomes D., Caignet I., Saenger A. & Ponette Q. (2019) : Les sols des forêts du réseau Renecofor séquestrent le carbone. *Forêt-Entreprise* 245 : 67-71.

Kerfriden B., Bontemps J.D. & Leban J.M. (2020) : Variations in temperate forest biomass ratio along three environmental gradients are dominated by interspecific differences in wood density. *IGN, Research Square* : <https://orcid.org/0000-0002-8998-6472>.

Kull S. Rampley G., Morken S., Metsaranta J., Neilson E. & Kurz W. (2014) : Modèle du bilan carbone du secteur forestier canadien (MBC-SFC3) à l'échelle opérationnelle – version 1.2 : guide de l'utilisateur. Service canadien des forêts, Centre de foresterie du nord, 404 p.

Leturcq Ph. (2020) : Empreinte carbone de la forêt et de l'utilisation de son bois *Revue Forestière Française* 72 : 525-537.

Leturcq Ph. (2020) : GHG displacement factors of harvested wood products: the myth of substitution. *Scientific Reports*, 10, 20752 <https://doi.org/10.1038/s41598-020-77527-8>.

Longuetaud F., Mothe F., Santenoise P., Desplanches P., Colin A. & Deleuze C. (2013) : Les coefficients d'expansion pour déduire différents volumes de branches à partir de volumes de tige. *Rendez-vous techniques* n°39-40, ONF p.48-59.

Loustau D. (2004) : Séquestration de carbone dans les grands écosystèmes forestiers en France. Quantification, spatialisation, vulnérabilité et impacts de différents scénarios climatiques et sylvicoles (Rapport final du projet Carbofor), 138p.

Mehtatalo L., Gregoire T.G., & de Miguel S. (2015) : Modeling Height-diameter curves for height prediction. *Canadian Journal of Forest Research*, 45(7) : 826-837 - doi:10.1139/cjfr-2015-0054.

Mongermont S., Martel S., Gleizes O. & Benest F. (2023) : Faciliter l'utilisation des tables de production forestières du Label Bas Carbone, le projet Biosylve. *Forêt-Innovation* 4 : 50-54.

Pardé J. & Bouchon J. (1988) : Dendrométrie 2e édition. ENGREF, Nancy.

Pignard G., Dupouey J.L., Arrouays D. & Loustau D. (2000) : Carbon stocks estimates for french forests. *Biotechnol.Agron.Soc.Environ.* 4-4 : 285-289.

Pretsch H. et al (auteurs multiples) (2023) : Competition(-based mortality and tree losses, An essential component of net primary production. *Forest Ecology and Management* 544 : 121204.

Roux A., Dhôte J.-F. (Coordinateurs), Achat D., Bastick C., Colin A., Bailly A., Bastien J.-C., Berthelot A., Bréda N., Caurila 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).

Saint-André L., Vallet P. et al (auteurs multiples) (2010) : Estimating carbon stocks in forest stands : 1. Methodological developments (chapter 4). Forests, carbon cycle and climate change. Editions Quae, p.79-100.

Senf C., Pflugmacher D., Zhiqiang Y., Sebold J., Knorn J., Neumann M., Hostert P. & Seidl R. (2018) : Canopy mortality has doubled in Europe's temperate forests over the last three decades. Nature Communications DOI: 10.1038/s41467-018-07539-6.

Taccoen A, Piedallu C, Seynave I, Perez V, Ge'gout-Petit A, Nageleisen L-M, Bontemps J-D, Gegout J-C. (2019) : Background mortality drivers of European tree species : climate change matters. Proc. R. Soc. B 286: 20190386. <http://dx.doi.org/10.1098/rspb.2019.0386>.

Thrippleton T., Hülsmann L., Cailleret M. & Bugmenn H. (2020) : Projecting forest dynamics across Europe – potentials and pitfalls of empirical mortality algorithms. Ecosystems, Springer Verlag 23(1), pp.188-203.

Valade A. (2022) : Du bon usage du concept de substitution carbone par la filière forêt bois. Canopée Forêts Vivantes-CIRAD, Angers, 24 pages.

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>.

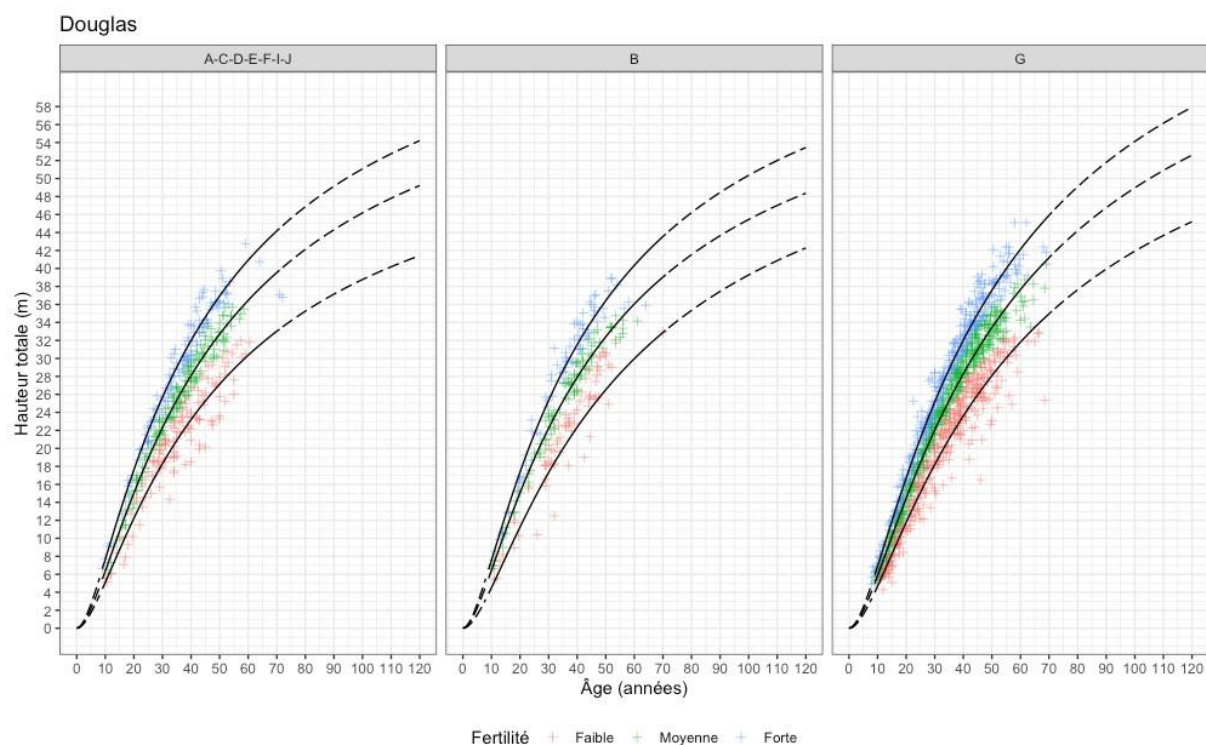
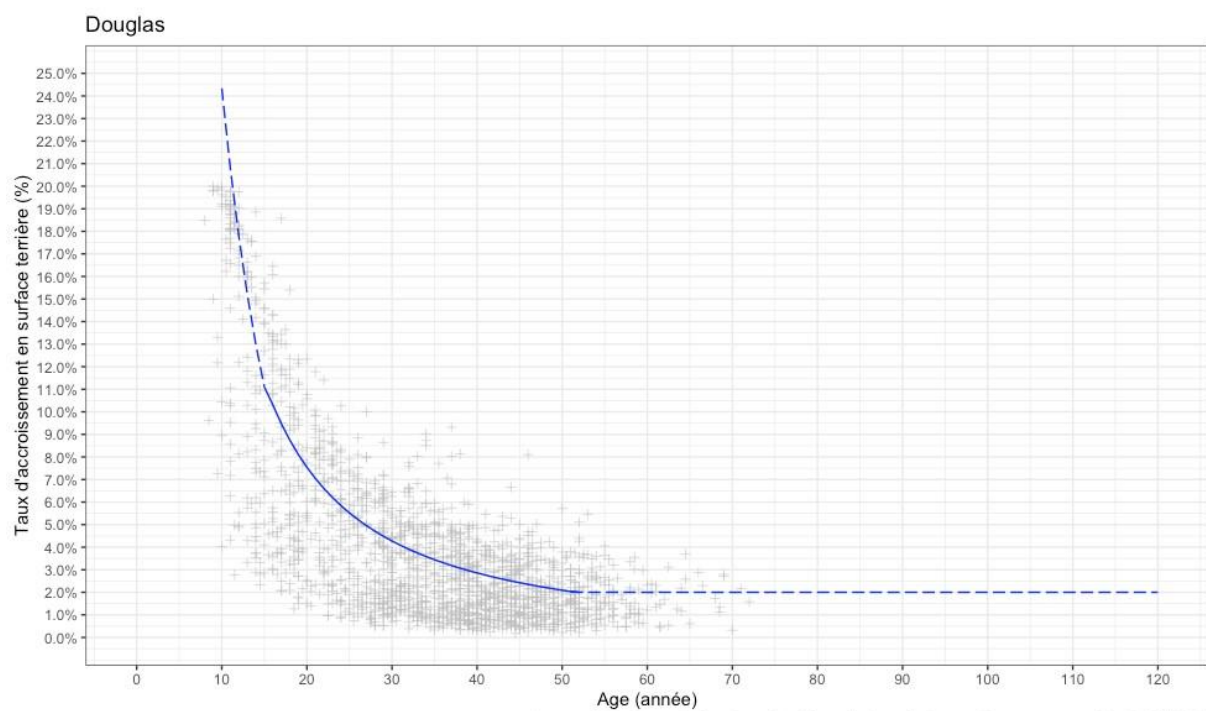
Valade A., Caurila S. & Belassen V. (2020) : Quantification des émissions évitées par l'usage du bois - les angles morts les plus courants et comment y remédier. Forêt Méditerranéenne XVI-4 : 347-354.

Valade A., Caurila S. & Belassen V. (2020) : Quantification des émissions évitées par l'usage du bois - les angles morts les plus courants et comment y remédier. Forêt Méditerranéenne XVI-4 : 347-354.

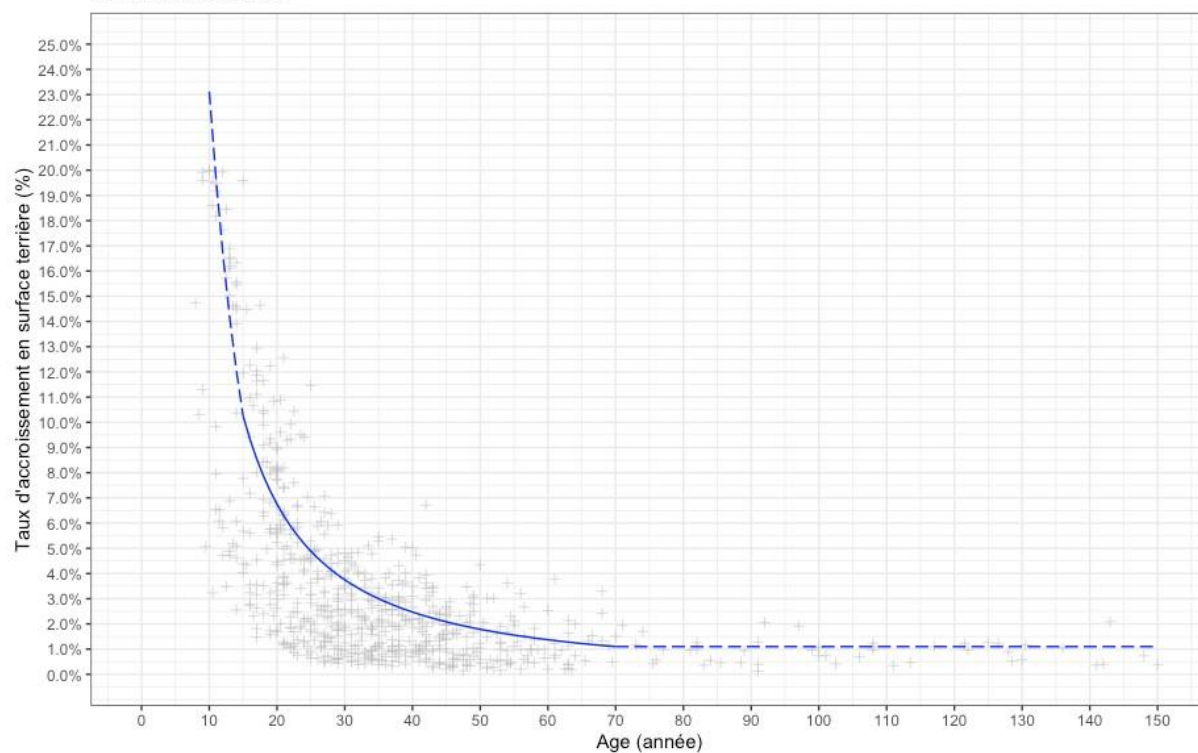
Zeide B. (1993) : Analysis of Growth equations. Forest Science 39 : 594-616.

Zhun M., Derrien D., Didion M., Liski J., Eglin T., Nicolas M., Jonard M. & St-André L. (2019) : Modelling soil organic carbon dynamics in temperate forests with Yasso07. Biogeosciences 16 : 1955-1973.

13. Annexe 2 – Exemple de modélisations à partir des données IGN

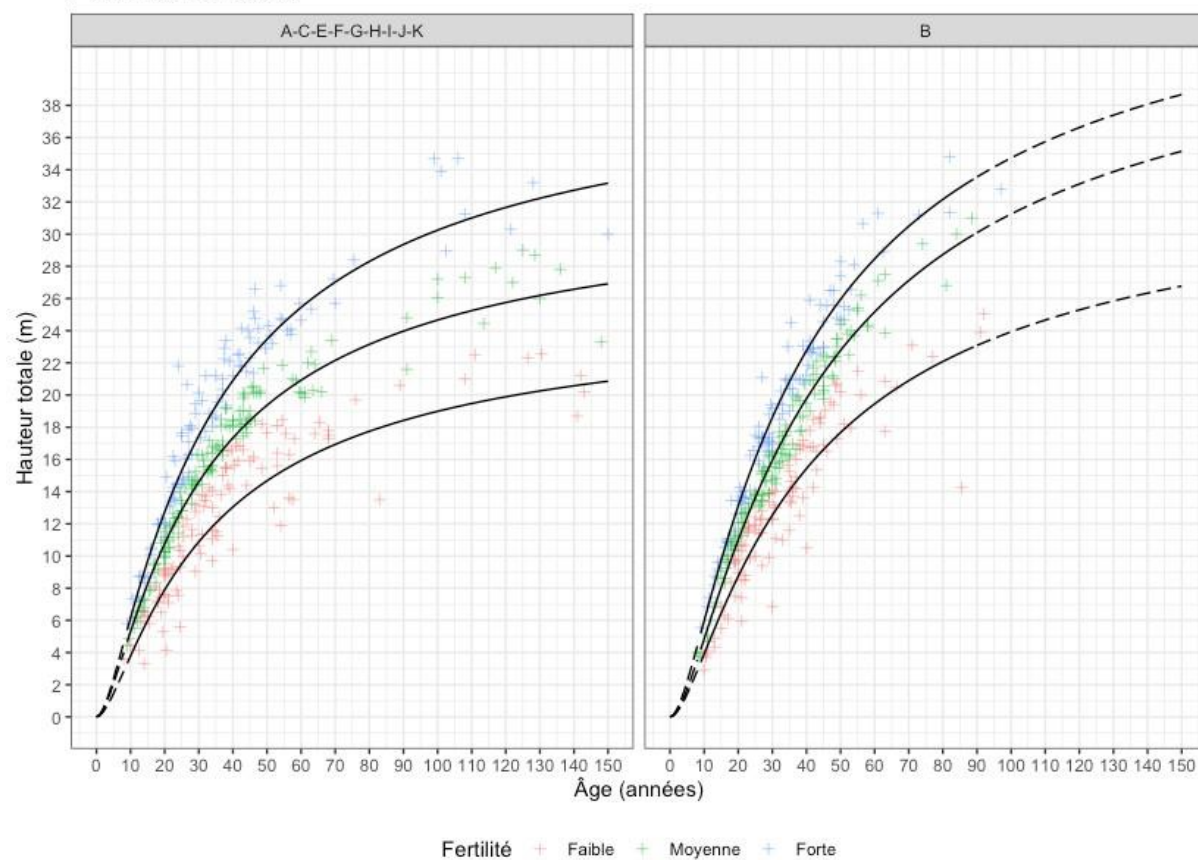


Pin laricio de Corse



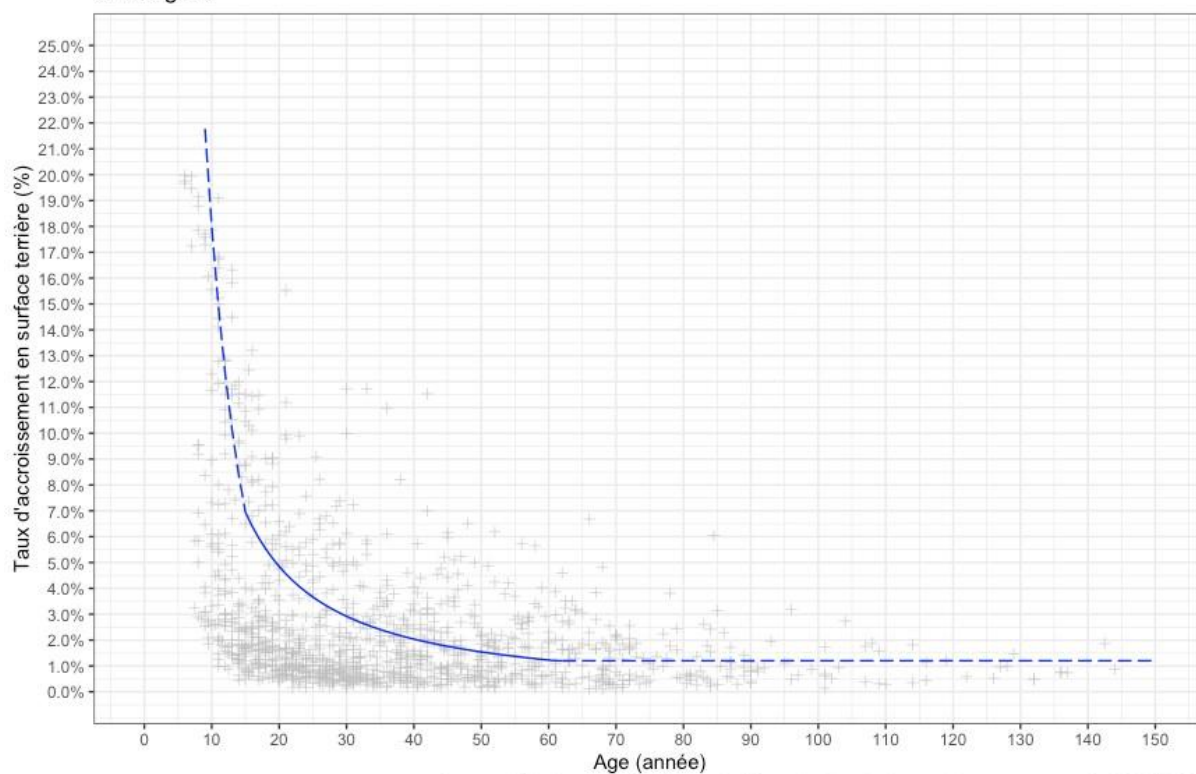
Source : IGN – Inventaire forestier national français, Données brutes, Campagnes annuelles 2006 à 2021

Pin laricio de Corse



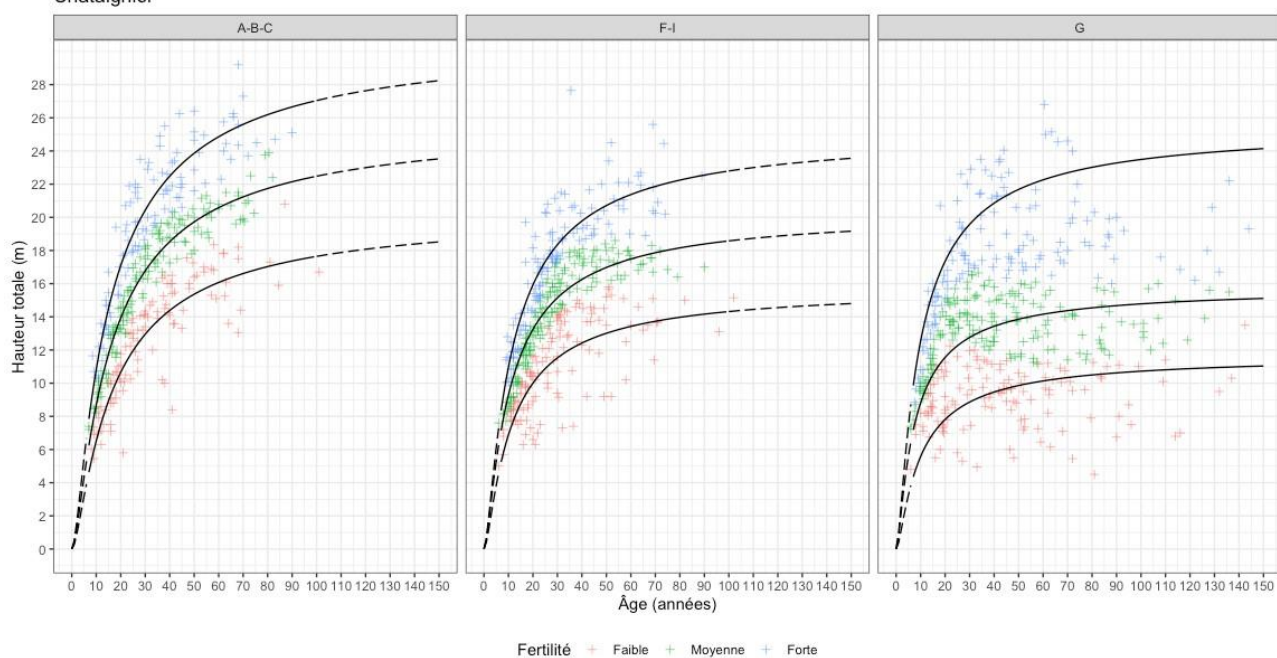
Source : IGN – Inventaire forestier national français, Données brutes, Campagnes annuelles 2006 à 2021

Châtaignier



Source : IGN – Inventaire forestier national français, Données brutes, Campagnes annuelles 2006 à 2021

Châtaignier



Source : IGN – Inventaire forestier national français, Données brutes, Campagnes annuelles 2006 à 2021