
Méthodologie de quantification de CO₂ EcoTree



EcoTree est une société spécialisée dans la valorisation écologique et économique de la forêt et de son renouvellement. EcoTree propose aux particuliers et aux entreprises d'investir dans la création et l'entretien de massifs forestiers en devenant propriétaires d'arbres sur des propriétés dont le foncier est détenu par EcoTree ou des tiers. En devenant propriétaires, nos clients soutiennent l'office écologique des forêts et en perçoivent les revenus. L'ensemble de la gestion forestière est assuré par les équipes d'EcoTree avec une approche sylvicole dite proche de la nature. Dans cette logique, EcoTree cherche à valoriser toutes les multifonctionnalités de la forêt, parmi lesquelles le stockage de carbone. En 2019, EcoTree a donc élaboré une première version d'un outil qui, basé sur l'itinéraire sylvicole, permet de quantifier le carbone stocké par nos forêts. Cette méthode est constamment améliorée, par exemple pour prendre en compte les produits de la filière bois ainsi que leurs effets de substitution, assurer la clause de permanence, etc. La présente méthode a fait l'objet d'une vérification par Bureau Veritas de son applicabilité aux projets de boisement réalisés par EcoTree.

Mots-clefs : séquestration de carbone, stockage de carbone dans les produits bois, substitution, Label Bas Carbone, sylviculture irrégulière, SMLT

Sommaire

1	Introduction	3
2	Glossaire et définition des termes utilisés	3
3	Récapitulatif d'un calcul de carbone	4
4	Les quatre piliers (ou critères) des crédits carbone	5
4.0.1	Unicité	5
4.0.2	Additionnalité	6
4.0.3	Mesurabilité	6
4.0.4	Permanence	6
5	Concept du Stock Moyen à Long Terme	7
5.1	Explication du concept de SMLT/LTA	7
5.2	SMLT adapté à la sylviculture irrégulière d'EcoTree	7
6	Méthode de création des itinéraires techniques	9
6.1	Déroulé de la méthode	9
6.2	Hypothèses	9
6.3	Exemples	10
7	Utilisation des métriques	10
8	Méthode pour la transformation du type de sylviculture	12
8.1	Additionnalité	12
8.2	Permanence	13
9	Calcul du carbone séquestré dans l'écosystème forestier selon la méthode LBC adaptée à 100 ans	13
10	Calcul du carbone séquestré dans les scénarios de référence	14
10.1	Reprise de terre agricole :	14
10.2	Boisement d'une prairie ou d'un pâturage :	14
10.3	Boisement d'une terre où il y aurait de la colonisation naturelle/enfrichement :	14
10.4	Transformation du mode de sylviculture	15
11	Calcul du carbone stocké dans les produits de la filière bois	15
11.1	Prise en compte des demi-vies :	15
12	Calcul des effets de substitution	15
13	Calcul des Réductions d'Emissions Anticipées (REA) générables du fait de la séquestration du carbone par l'écosystème forestier	16
14	Calcul des REA générables du fait du stockage du carbone dans les produits de la filière bois	17
15	Calcul des Réductions d'Emissions Indirectes (REI) générables	17
16	Limites	17
17	Références	19
18	Annexes	20
18.1	Annexe 1 — Pourcentages des différentes qualités de bois	20
18.2	Annexe 2 — Evolutions de la méthode	20
18.3	Annexe 3 — Procédure de vérification par Bureau Veritas	20

1 Introduction

Pour rappel, cette méthode repose sur un modèle, qui prend comme valeurs d'entrée un itinéraire technique (donc une essence associée à une classe de fertilité), une surface et un scénario de référence ; et retourne les valeurs correspondant aux 3S du carbone (séquestration, stockage et substitution, voir au chapitre 2.).

Dans la suite du présent document seront détaillées chacune des étapes du processus (chapitre 3), ainsi que la méthode utilisée pour créer les itinéraires techniques (chapitre 6). La présentation des quatre piliers des crédits carbone (ou plus selon les méthodes de vérification mises en place) fera l'objet d'une justification sur le bien fondé de la présente méthode (chapitre 4).

En effet, compte tenu de l'intérêt du carbone dans la lutte contre le réchauffement climatique, EcoTree a travaillé au développement d'un outil permettant de quantifier, sur la base de l'itinéraire sylvicole choisi, le stockage global de carbone espéré pour chaque peuplement. Les clients d'EcoTree peuvent ainsi constater les bénéfices d'une bonne gestion forestière en termes de stockage de carbone.

Si cet outil de quantification se base sur les équations de quantification du Label Bas Carbone [Label Bas Carbone, 2020a, Label Bas Carbone, 2020b] Version 2 du 27/07/2020, il s'en distingue par le fait qu'EcoTree ne limite pas ses calculs à 30 ans, mais quantifie le carbone stocké tout au long de la durée de vie des arbres et le concept de LTA « infini » est introduit (chapitre 5).

Une méthode de quantification du carbone additionnel pour un changement de sylviculture vers la sylviculture mélangée à couvert continu est proposée (chapitre 8).

La présente méthode ne prend pas en compte les aspects en relation avec la préservation de la biodiversité étant entendu qu'elle propose des justifications et éléments de calculs du carbone dans les projets forestiers. Pour autant, le choix de la sylviculture mélangée à couvert continu est une position forte et qui va dans ce sens, d'un part. D'autre part, une valorisation de la biodiversité dans le cadre du marché de la contribution à la lutte contre le réchauffement climatique pourra faire l'objet d'une publication ou d'une méthode spécifique. Il en est de même pour la valorisation des services écosystémiques hors matériau bois et stockage de carbone.

Tous les termes techniques utilisés dans la présente méthode sont définis dans le glossaire au chapitre 2.

2 Glossaire et définition des termes utilisés

Les termes suivants ont été tirés du glossaire forestier canadien [Canada Forest Service, 2023].

Rotation : durée séparant deux passages successifs d'une coupe de même nature dans la même parcelle. Ex : rotation de 12 ans pour les coupes d'éclaircies de feuillus. (Glossaire de sylviculture)

Révolution : durée de renouvellement d'un peuplement séparant deux coupes rases ou régénérations successives.

Hauteur dominante : moyenne des hauteurs totales des cent plus gros arbres à l'hectare dans un peuplement.

Surface terrière : somme des surfaces des sections des tiges d'un peuplement à 1,3 m du sol. Elle s'exprime donc en m²/ha.

Volume bois fort : volume de bois d'un arbre pour un diamètre de découpe s'arrêtant à 7 cm.

Litière : la litière est l'ensemble des feuilles mortes et des débris végétaux en décomposition sur le sol ; elle accueille un écosystème d'organismes décomposeurs qui la transforme peu à peu en humus.

Humus : couche supérieure du sol créée et entretenue par la décomposition de la matière organique, essentiellement par l'action combinée des animaux, des bactéries et des champignons du sol ; elle est de couleur foncée car elle contient beaucoup de carbone.

Productivité : accroissement du volume de matière ligneuse (en m³/ha/an).

Les termes suivants sont spécifiques au calculs de carbone.

Les 3 S :

- Séquestration (dans la biomasse) : piégeage du CO₂ dans la biomasse par photosynthèse.
- Stockage (dans les produits) : stockage du CO₂ dans les produits de la filière bois (meubles, caquettes, poutres, copeaux, etc.).
- Substitution : fait de remplacer les sources d'énergie fossile (charbon, pétrole...) ou l'utilisation de matériau à la production énergivore et/ou polluante (aluminium, béton) par du bois. Les quantités de carbone évitées

par l'utilisation de ce matériau renouvelable plutôt qu'un autre non-renouvelable sont dites substituées. Le coefficient de substitution dépend du type de produit bois : BO, BI, BP ou BE.

Biomasse : masse ou quantité totale de matière organique provenant d'organismes vivants, dans une zone particulière à un moment donné.

- Biomasse d'un arbre : biomasse aérienne + biomasse racinaire d'un arbre vivant.
- Biomasse aérienne : comprend le tronc et le houppier.
- Biomasse racinaire : comprend la partie racinaire dans le sol.

Infradensité : rapport entre la masse de bois sec et le volume de bois vert = masse sèche contenue dans le volume humide.

tMS : tonne de masse sèche, c'est la métrique utilisée pour calculer le volume avant de passer en évaluation du carbone (taux de carbone = 0.475 tC/tMS) puis équivalent en dioxyde de carbone.

Carbone vs dioxyde de carbone (C/CO₂) : Certains documents utilisent le carbone plutôt que le dioxyde de carbone comme valeur. La fraction de carbone dans le dioxyde de carbone est le rapport de leurs poids. Le poids atomique du carbone est de 12 unités de masse atomique, tandis que le poids du dioxyde de carbone est de 44, car il comprend deux atomes d'oxygène qui pèsent chacun 16. Donc, pour passer de l'un à l'autre, il faut utiliser la formule : une tonne de carbone équivaut à $44/12$ (tCO₂/tC) = 3.67 tonnes de dioxyde de carbone. Ainsi, 11 tonnes de dioxyde de carbone égalent 3 tonnes de carbone.

SMLT : Stock Moyen à Long Terme (« Long-Term average (LTA) » dans la méthode Verra) est une valeur en relation avec le concept de permanence des crédits carbone. Cette notion est développée plus bas (cf chapitre 5).

REA : Réductions d'Emissions Anticipées, compartiments de carbone associés à la séquestration et au stock dans les produits bois.

REI : Réductions d'Emissions Indirectes, compartiment de carbone associé à la substitution.

SMLT / LTA et LTA « infini » : Stock Moyen sur le Long Terme ou *Long Time Average*, ces concepts sont expliqués en détail dans le chapitre 5.

Bilan EcoTree : différence entre la captation (séquestration et stock dans les produits bois) de carbone du projet et celle du scénario de référence à t = 100 ans.

Note : les métriques utilisées par EcoTree sont explicitées plus avant au chapitre 7.

Pourcentages BO-BI-BP-BE : BO = bois d'œuvre (charpentes, poutres, menuiserie...) ; BI = bois d'industrie (palettes, panneaux...) ; BP = bois pour pâte à papier ; BE = bois énergie (plaquettes forestières, bûches...). Selon le diamètre et la qualité des troncs coupés, leur devenir est réparti entre ces différentes catégories. Les prix et les durées de vie en dépendent également : $BE < BP < BI < BO$.

Demi-vie : temps au bout duquel la moitié du carbone (ou équivalent CO₂) stocké dans le bois est retournée à l'atmosphère du fait de la dégradation du matériau. Il dépend du type de produit bois : BO, BI, BP ou BE. Ceci est détaillé au chapitre 11.

3 Récapitulatif d'un calcul de carbone

Les paramètres d'entrée sont :

- essence et classe de fertilité
- type de gestion (régulier ou irrégulier)
- surface évaluée pour le peuplement

-
- scénario de référence sur la parcelle

L'essence et la classe de fertilité sont représentées par l'itinéraire technique qui détaille l'évolution du stock de bois en fonction du temps. La station forestière (c'est-à-dire le climat, la pédologie et la géologie) dicte la classe de fertilité et fait l'objet d'une étude en interne ou avec un expert externe. Ces études préconisent aussi les essences susceptibles de survivre dans les premières années après la plantation mais aussi dans un temps long, selon les scénarios de réchauffement du GIEC. Ces justifications sont présentes sur l'attestation fournie lors de la vérification des calculs. La fertilité est catégorisée en trois classes, f1 : très poussant, f3 : peu poussant.

Lors d'une étude de terrain, des données pédologiques sont collectées (coefficient de rétention d'eau, pH, type de sol), les peuplements alentours sont évalués. De même, des données météorologiques sont recherchées sur les bases de données appropriées (températures, précipitations moyennes et extrêmes), ainsi que la géologie du site. Ces données servent à évaluer la classe de fertilité des essences choisies et sont précisées à l'expert qui valide les itinéraires pour chaque peuplement.

Le processus du calcul est comme suit :

- (i) calcul du carbone de la biomasse forestière ; depuis la table de production sélectionnée par l'essence et la classe de fertilité, une interpolation linéaire est réalisée entre chaque éclaircie, sauf entre la plantation et la première éclaircie où une interpolation polynomiale d'ordre 2 est réalisée (dans le cas d'un calcul pour des métriques LBC, une interpolation exponentielle est utilisée). Cela n'influence que le calcul de REA à 100 ans (ou 30 ans) et pas le calcul du LTA « infini »,
- (ii) calcul du carbone des autres compartiments (litière, sol, bois mort),
- (iii) calcul du carbone issu du scénario de référence,
- (iv) calcul des métriques REA forêt à 30 ans ou 100 ans (selon métrique recherchée) ou utilisant le LTA « infini ». (pour la sylviculture irrégulière) ; ces métriques sont explicitées au chapitre 7,
- (v) calcul du carbone stocké dans les produits bois,
- (vi) calcul des métriques REA produits à 30 ans et à 100 ans ou en utilisant le LTA « infini »,
- (vii) calcul des effets de substitution et des REI,
- (viii) calcul du REA total ainsi que de la valeur spécifique à EcoTree et la présente méthode.

Les métriques qui sont utilisées, selon les cas, sont explicitées dans le chapitre 7.

4 Les quatre piliers (ou critères) des crédits carbone

Dans la présente section seront détaillés les quatre grands critères de validité des crédits carbone et pourquoi la méthode EcoTree respecte ces critères. En effet, nous considérons ces critères comme des gardes-fou qui garantissent une qualité et une robustesse à la présente méthode.

Cependant, La présente méthode ne précise que la façon dont sont calculées les différentes métriques des 3S du carbone, elle ne couvre pas les aspects légaux ni ne décrit quels projets sont acceptés ou non. Elle se situe après ces considérations dans le processus. Comme précisé ci-après lorsque nécessaire, les autres critères qui feront que le projet est accepté ou non (légaux, économiques) sont évalués lors de la phase de « montage du projet », c'est-à-dire par exemple le choix du terrain, la recherche du scénario de référence, la validation des critères obligatoires, etc. avant la partie calculatoire.

4.0.1 Unicité

Un crédit carbone ne peut être utilisé qu'une seule fois, par une seule entité, afin d'éviter les problèmes de double comptabilité i.e. si deux entités revendiquaient un même projet de captation de 100 tonnes de CO₂eq, on estimerait

que $2 \times 100 \text{ tCO}_2\text{eq} = 200 \text{ tCO}_2\text{eq}$ ont été captées, quand en réalité, le total capté ne représente que $100 \text{ tCO}_2\text{eq}$.

Pour éviter ce genre de situation, les grands acteurs du marché volontaire du carbone ont mis en place des registres dans lesquels ils inscrivent individuellement les crédits associés à chaque projet, en attribuant à chacun une référence unique.

Cette contrainte n'est pas prise en compte par la présente méthode. En revanche il est évident que des procédures sont mises en place pour la respecter, cependant ce n'est pas le but de la présente méthode.

4.0.2 Additionnalité

Tout est calculé par rapport à un scénario de référence, qui représente ce qu'il se passerait si le projet n'était pas réalisé. Il faut prouver que les réductions d'émissions n'auraient pas eu lieu dans ce scénario de référence.

Physique/biologique : On ne valorise que les tonnes de CO_2eq qui ont été captées/évitées dans le cadre du projet, moins les tonnes qui auraient de toute façon été séquestrées dans le scénario de référence. Par exemple, si un projet forestier permet de capter 10 tonnes, mais que, dans le scénario de référence, une friche s'était naturellement développée sur la même parcelle et avait capté 4 tonnes, alors on ne pourrait générer que $10 - 4 = 6$ crédits carbone. Le chapitre 10 concernant les calculs en relation avec les scénarios de référence détaille ce point.

Economique : Pour que les réductions d'émissions soient additionnelles, il faut également prouver qu'elles n'auraient pas pu avoir lieu sans la valorisation des crédits carbone. Cette contrainte n'est pas prise en compte par la présente méthode. Ceci étant, l'additionnalité économique fait partie des critères qui sont respectés dans les montages de projets.

Réglementaire : Enfin, l'additionnalité est aussi dépendante de la réglementation. S'il était interdit de rouler avec une voiture essence ou diesel, on ne pourrait pas récompenser l'utilisation plus propre d'une voiture électrique. De même, s'il était obligatoire de planter des arbres sur une friche, la plantation d'arbres deviendrait le scénario de référence, et aucun crédit carbone ne pourrait en être issu. Cette contrainte n'est pas prise en compte par la présente méthode mais dans le montage des projets.

4.0.3 Mesurabilité

Il doit être possible de mesurer/vérifier les réductions d'émissions pour garantir que chaque crédit correspond bien à $1 \text{ tCO}_2 \text{ eq}$ évitée ou captée. Dans le cadre de projet de boisement, reboisement ou changement de mode de gestion sylvicole, les tonnes de CO_2 équivalentes sont directement reliées au volume de bois. Il est possible de mesurer le volume d'un arbre ou d'un peuplement, que ce soit grâce à un inventaire en plein (on mesure la dendrométrie de chaque arbre de la parcelle) ou statistique avec la technique des placettes permanentes ou non-permanentes.

4.0.4 Permanence

Il n'existe pas à notre connaissance de définition formelle de la permanence dans ce cadre. En substance, pour être valide, un crédit carbone doit être associé à une réduction d'émissions permanente, et théoriquement irréversible.

Un arbre ayant une durée de vie limitée, il ne peut être considéré que comme un stock de carbone temporaire, réversible : en effet, que le bois mort soit abandonné en forêt ou utilisé comme du bois d'œuvre, il finira de toute façon par se décomposer ou être brûlé, à plus ou moins long terme. On ne saurait donc associer un crédit carbone à des arbres spécifiques.

A l'inverse, la quantité de carbone séquestré à l'échelle de la forêt peut être considérée comme permanente. Dans une seule et même forêt gérée durablement, tous les arbres finiront par être remplacés par de nouveaux. Dans le cas où un aléa naturel (ou autre) mettrait fin au peuplement en place, le scénario de référence étant celui du début du projet, la permanence est garantie par une non-additionnalité et la limite fixée par le Stock Moyen sur le Long Terme (cf chapitre 5).

5 Concept du Stock Moyen à Long Terme

5.1 Explication du concept de SMLT/LTA

- SMLT : Stock Moyen à Long Terme
- LTA : Long Term Average (depuis Verra [Verra, 2018])

Le vocabulaire de « moyen » (ou « *average* ») est ambigu. Il ne s'agit pas ici d'une moyenne même si le calcul le laisse supposer car les valeurs sur lesquelles se base l'équation sont des valeurs cumulatives (le stock de bois fort sur une parcelle forestière ou par extension le dioxyde de carbone séquestré sur ladite parcelle). Cela n'a donc aucun sens de parler de moyenne.

Le concept de SMLT est en relation avec **le concept de permanence des crédits carbone. Il définit en substance la valeur théorique maximale du volume de bois sur une parcelle forestière, sur un temps infini.** Ce concept est particulièrement important lorsque le stock de bois fluctue fortement, par exemple dans le cas d'une gestion équiennne (ou en sylviculture régulière) où l'on assiste à une succession de rotations forestières (plantation, éclaircies, coupe rase, etc.). Dans ce cas on a la répétition « à l'infini » d'un motif, le SMLT représente une valeur statistique si celle-ci était constante. La formule consisterait à additionner le stock de bois par an, toutes les années de 0 à n, et à diviser par le nombre d'années (donc n), lequel est infini. On doit donc prendre la limite lorsque n tend vers l'infini. Mathématiquement, cela est équivalent à faire le calcul sur une rotation (elle est répétée à l'identique à l'infini, le nombre de rotations « se simplifie »).

5.2 SMLT adapté à la sylviculture irrégulière d'EcoTree

Dans le cas où l'on n'a pas de motif répétitif, la méthode Verra préconise de prendre pour le calcul précédent : valeur de $n =$ la durée du projet. **Cela revient à dire, si on se replace dans un contexte forestier, que l'on effectue une coupe rase à la fin du projet et que l'on repart pour un projet identique, qui devient le motif.** Dans la suite de ce document nous appellerons cette méthode la méthode Verra [Verra, 2018]. Nous pensons que cela ne représente pas convenablement la réalité de la sylviculture de type irrégulier que nous pratiquons.

En effet, la sylviculture irrégulière présente la particularité de **viser un état stable où tout le volume qui est extrait de la forêt est remplacé par la régénération naturelle, on tend vers un état stationnaire.** Cela est modélisé chez EcoTree par une série de motifs identiques qui représente l'évolution du stock de bois fort entre chaque éclaircie, et qui se répète à l'infini. Le SMLT, dans ce cas, est la valeur calculée comme précédemment sur l'un de ces motifs¹, la figure 1 propose un exemple sur le Douglas, la figure 2 sur le Chêne Sessile. Dans la suite de ce document nous appellerons cette méthode la méthode « infini ».

Il est à noter que dans le cas d'un scénario de référence agricole le motif final n'est pas réellement stable au cours du temps. Ceci est dû à l'équation de stockage du carbone dans le sol (voir chapitre 9). Nous utilisons tout de même le dernier motif pour le calcul dans la mesure où nous restons conservateurs ce faisant, le sol agricole continuant de tendre lentement vers un sol forestier plus riche.

De la même façon, le cas des stocks produits est plus compliqué car il n'est pas réellement stable non plus mais évolue lentement au cours du temps ; dans la plupart des cas il augmente. Nous utilisons ce nonobstant, la même méthode (i.e. on postule que le dernier motif se répète à l'infini) ce qui implique une valeur conservatrice et va dans le sens du respect de la nature versus le modèle.²

Dans le cas des scénarios de référence, les valeurs étant stationnaires (le scénario friche devient stationnaire à partir de 75 ans, cf. chapitre 10) **les valeurs du SMLT sont ces valeurs stationnaires**, quelle que soit la méthode (Verra ou « infini »). Par exemple, pour la friche la SMLT en volume est de 75 m³/ha.

¹Notre modélisation de sylviculture nous amène à définir un motif qui correspond à la fonction volume/temps entre deux éclaircies. Si l'on pose ce motif comme le terme d'une suite, il existe un certain rang N à partir duquel la différence entre deux termes tend vers zéro. En fait, à partir du moment où l'on se situe dans la zone irrégulière (régime permanent) cette différence est par définition du modèle égale à zéro, ce même motif étant répété *ad infinitum*. Cette suite est donc une suite de Cauchy. De plus cette modélisation est effectuée sur \mathbb{R} (l'ensemble des réels, de dimension finie 1), donc un espace de Banach. La suite est donc convergente (vers une valeur limite, ici le SMLT/LTA). Le début de l'itinéraire n'a donc conceptuellement aucun impact sur la valeur limite, celle-ci ne dépend que de l'état stationnaire.

²La méthode de calcul par demi-vies est déjà basée sur des coefficients conservateurs.

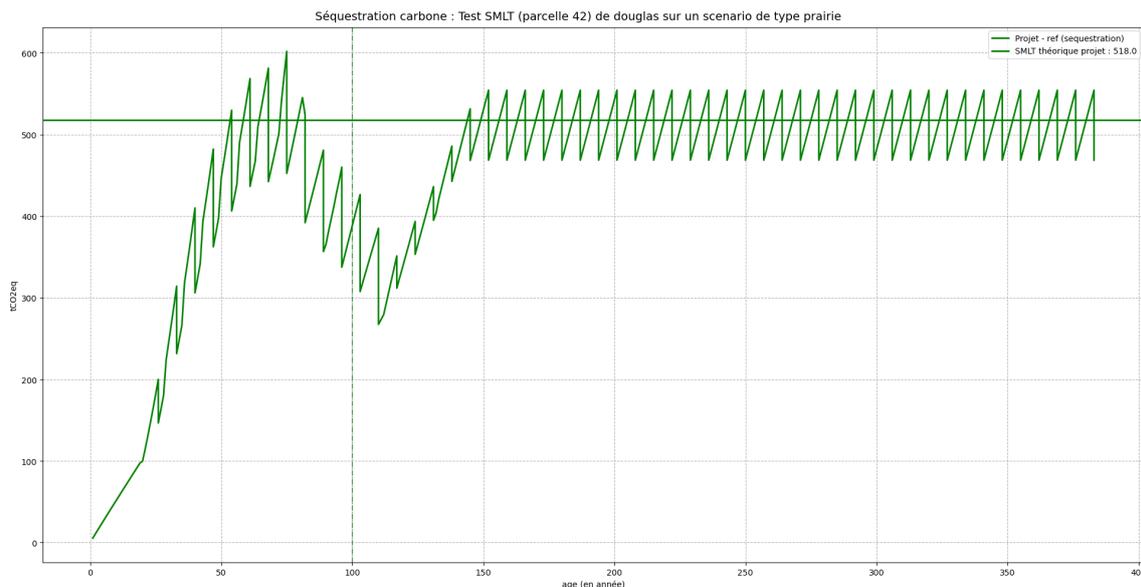


Figure 1: Exemple dans le cas de la séquestration du carbone sur un itinéraire irrégulier de Douglas pour un scénario de type prairie

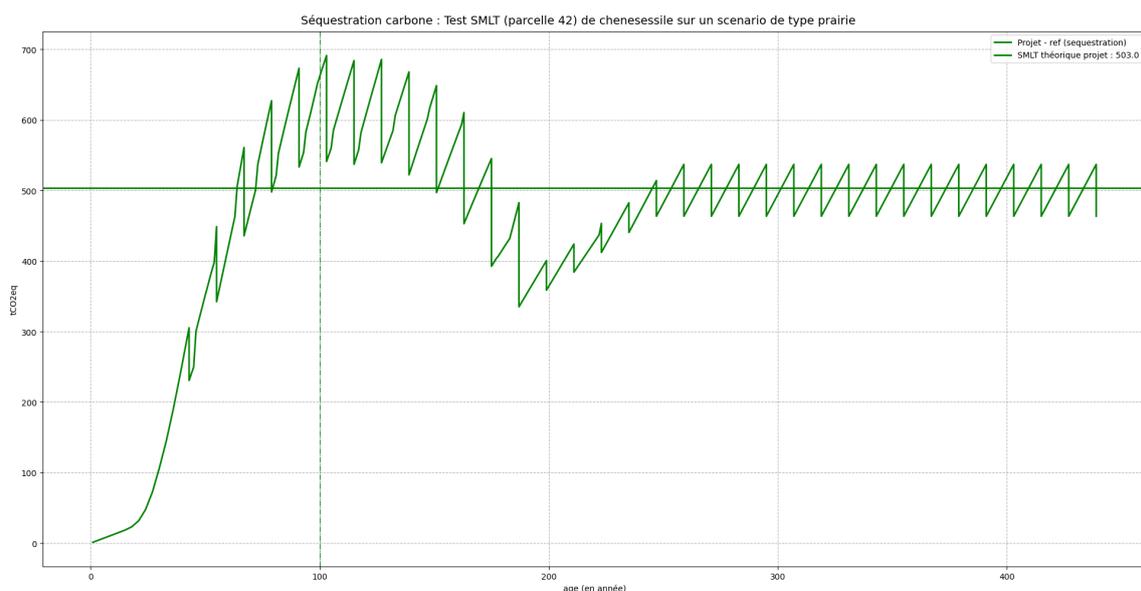


Figure 2: Exemple dans le cas de la séquestration du carbone sur un itinéraire irrégulier de Chêne Sessile pour un scénario de type prairie

Dans un souci d'humilité par rapport à notre modèle expérimental de sylviculture irrégulière, une décote de 10 % est appliquée au calcul du SMLT du projet, que ce soit sur la partie de séquestration ou sur la partie de stock des produits bois. Cette décote est inspirée de la justification de la méthode boisement du LBC [Label Bas Carbone, 2020a] sur les risques de non-permanence. Cependant, pour rester conservateur, cette décote n'est pas appliquée sur les calculs de SMLT des scénarios de référence. Dans ce sens, ce terme de décote est à séparer du terme « buffer » qui représente une façon de partager les risques en réservant un certain nombre de tonnes de CO₂eq, ici 10 % des tonnes ne sont simplement pas prises en compte par le calcul pour la partie projet.

6 Méthode de création des itinéraires techniques

Les données d'entrée de tout calcul de carbone repose sur une évaluation de la biomasse des peuplements présents sur les parcelles forestières du projet. Il n'existe pas à l'heure actuelle d'itinéraires techniques spécifiques pour la sylviculture mélangée à couvert continu (ou sylviculture irrégulière). La stratégie d'EcoTree a été de partir de données aussi fiables et acceptées que possible : les itinéraires techniques par essence de sylviculture régulière produits par le logiciel Capsis [CIRAD, 2023] développé par le CIRAD et l'INRAE ainsi que les valeurs de surface terrière par essence observées par le réseau AFI (Association pour la Futaie irréguliers) et l'association Pro Silva.

L'enjeu est d'envisager comment passer des valeurs (en m³ de bois fort par hectare) des itinéraires Capsis données avec une modélisation à la tige, à une modélisation statistique du peuplement dans sa forme stationnaire base de la futaie irrégulière. Pour cela une méthode a été développée, informatisée par les équipes d'EcoTree et affinée avec des experts forestiers indépendants. Le modèle postule donc un début en plantation mixte. On considère qu'au moins 70 % du peuplement est de l'essence objectif, avec environ 20 % d'une essence d'accompagnement à la croissance similaire (afin d'assurer la compatibilité des essences, par exemple ne sont pas associés des chênes pubescents et des pins maritimes aux croissances très différentes, le chêne serait totalement dominé par le pin) et environ 10 % d'essences dites de biodiversité. Ces pourcentages sont indicatifs mais nous semblent cohérents afin qu'un itinéraire technique (celui de l'essence objectif) représente correctement le peuplement. Dans le cas où on aurait un peuplement mixte avec des pourcentages de mixité inférieurs à 70 %, celui-ci serait modélisé par deux peuplements distincts au prorata des surfaces.

6.1 Déroulé de la méthode

- mise en forme des résultats de simulation de Capsis ;
- extrapolation des valeurs en volume, surface terrière et en diamètre jusqu'aux catégories de bois finales (selon les diamètres d'exploitabilité reconnus) ;
- calcul des valeurs d'accroissements (annuel, moyen) pour chaque catégorie de bois, si possible vérification de la date prévue de coupe finale dans le scénario régulier ;
- description des valeurs objectives pour chaque catégorie de bois pour la partie stationnaire (en surface terrière et nombre de tiges) et obtention des volumes associés statistiques (i.e. chaque catégorie de bois est représentée par son diamètre moyen) ;
- création de la matrice de passage inter-catégories de bois et taux de prélèvement (aussi par catégories de bois) ;
- calcul de la date de démarrage de la régénération en fonction de l'âge de maturité sexuelle, de la valeur envisagée du taux d'accroissement modulée par l'aspect héliophile, et de l'effet de salle d'attente ;
- calcul des répartitions au cours du temps de toutes les catégories de bois pour obtenir la valeur théorique autour de laquelle oscille le peuplement à l'équilibre ;
- modification du modèle de sylviculture régulière afin de préparer la transition entre celle-ci et la partie stationnaire ;
- création de la partie transitoire en suivant la méthode Pro Silva en volume et surface terrière totale ;
- calcul des valeurs pour la plantation jusqu'à conserver 10 % du volume en arbres de biodiversité et d'ensemencement.

6.2 Hypothèses

Toute la démarche est purement théorique et est soumise aux aléas de la station et du climat, un certain nombre d'hypothèses sont à garder en tête (et sont explicitées ci-après).

- Les accroissements calculés depuis le modèle Capsis sont modulés par essence afin de prendre en compte que la régénération s'effectue sous couvert.

- On déclenche le processus d'irrégularisation (coupes rapprochées, volumes récoltés modifiés selon si l'on s'engage vers une capitalisation ou une décapitalisation afin d'atteindre l'état d'équilibre) lorsque le volume sur la parcelle est égal à une valeur dépendant du volume maximal donné par Capsis et le volume maximal du stade permanent. Le seuil de déclenchement est donné par la formule :

$$V_{déclenchement} = V_{max_régulier} - (V_{max_régulier} - V_{max_stationnaire}) / coefficient_{essence}$$

avec le coefficient essence une variable dépendant de l'aspect héliophile et des croissances moyenne et annuelle.

- Les équations permettant d'interpoler ou d'extrapoler les diverses valeurs nécessaires à la modélisation sont choisies en fonction de leur affinité avec le modèle Capsis : loi puissance, polynômes de degrés deux ou trois, exponentielles, sigmoïdes...
- Le modèle Capsis et les valeurs de surface terrière AFI (figure 3 [ProSilva, 2013]) sont autant de garde-fous qui bornent les valeurs du modèle final.

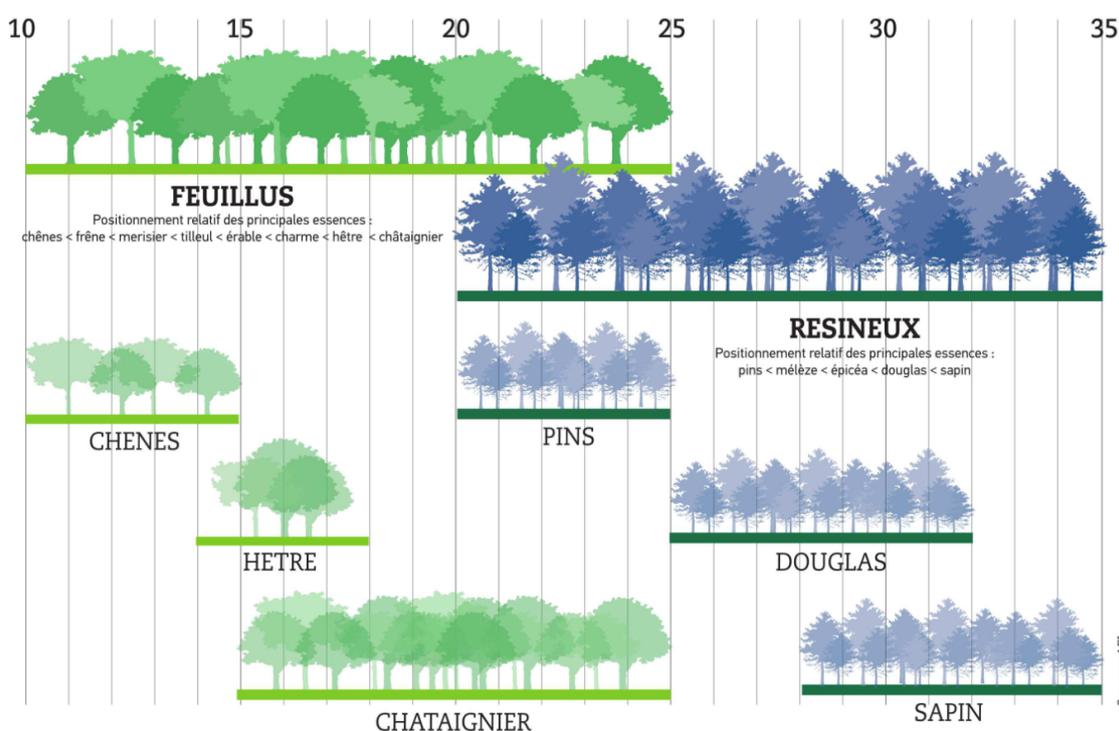


Figure 3: Préconisations AFI par essences en terme de surface terrière à l'équilibre (avant coupe et sans le sous étage) [ProSilva, 2013].

6.3 Exemples

La figure 4 présente le passage entre la phase comprenant les valeurs à l'équilibre et les valeurs modifiées de la partie régulière, et la phase finale avec la transition implémentée. L'exemple choisi est celui du Douglas pour la classe de fertilité 2. Un autre exemple est présenté pour le Chêne sessile, toujours en classe de fertilité 2 sur la figure 5. La courbe noire représente les valeurs données par le logiciel Capsis, les courbes *sw*, *mw*, *lw* et *v_{lw}* représentent respectivement les volumes de petit bois, bois moyen, gros bois et très gros bois. La courbe verte épaisse représente le volume total tandis que celle en traits fins représente le volume de la plantation initiale.

7 Utilisation des métriques

Les chiffres affichés par EcoTree sur ses prévisions du carbone des projets forestiers en fin de projet (à t = 100 ans donc) sont les valeurs calculées selon le méthode du SMLT « infini », purement additionnelles pour les parties

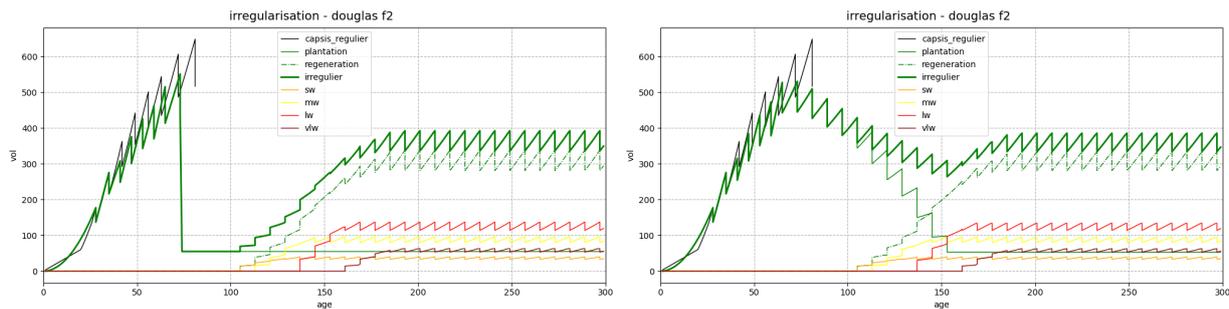


Figure 4: Etapes avant et après formalisation de la transition pour du Douglas en classe de fertilité 2

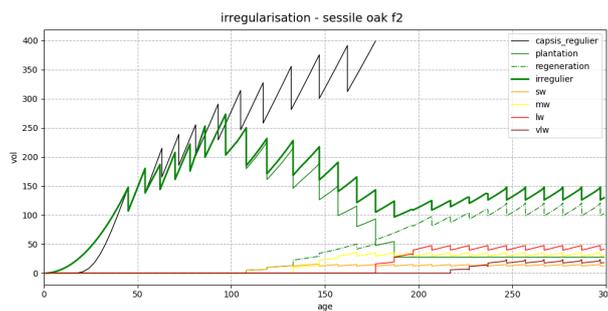


Figure 5: Exemple finalisé du Chêne sessile en classe de fertilité 2

séquestration et stock produits bois ainsi que, de manière indicative, la REI pour la partie substitution à cette date finale. Par cela est entendue ladite valeur SMLT « infini » de la séquestration carbone à la fin du projet (avec la décote de 10 % comme explicité dans le chapitre 5), plus la valeur SMLT « infini » du stockage dans les produits (idem pour la décote), moins la valeur SMLT « infini » de la séquestration du scénario de référence (sans la décote). En effet, il n'y a pas de stockage dans les produits bois pour nos scénarii de référence (cf. chapitre 10).

Cette valeur est préférée à la valeur REA qui apporte des restrictions très conservatrices et ne s'applique pas à la stratégie sylvicole d'EcoTree qui valorise la gestion sur le long terme par la mise en place d'itinéraires irréguliers. En effet, les projets de boisement ou reboisement d'EcoTree n'ont pas vocation à aboutir à une coupe rase mais bien à consolider le patrimoine forestier et la biodiversité d'un écosystème forestier complet. De la même façon, travailler avec le vivant sur des projets à long terme implique pour les clients d'EcoTree d'en accepter les risques inhérents. EcoTree prépare ses plans de gestion forestiers en prenant en compte, au mieux des connaissances actuelles, les futurs aléas dus au changement climatique avec, par exemple, le choix des essences plantées et les théories de résilience des écosystèmes comme paramètres.

Il y a donc, pour chaque projet forestier incluant de la plantation, trois métriques calculées :

- la valeur appelée « bilan EcoTree » qui correspond au stock de carbone additionnel à la fin du projet (i.e. *séquestration du projet – séquestration du scénario de référence + stock produits projet*), souvent c'est à 100 ans que s'arrêtent les projets. Dénomination **Bilan de séquestration et stockage carbone additionnel à 100 ans**, cette valeur est indicative.
- les REAs (forêt + stocks produits + total) calculées selon les équations LBC avec la méthode du SMLT Verra (i.e. sur la durée du projet donc le plus souvent 100 ans). Dénomination **REA forêt, REA produits et REA totale**. Dans les cas où la date de fin de projet correspond à une date de coupe, les valeurs de séquestration et de stock produits (et donc de substitutions possibles) qui sont utilisées correspondent aux valeurs « avant coupe », on considère en effet que les coupes sont effectuées en fin d'année.
- les valeurs « forêt » + « stocks produits » + « totales » calculées selon la méthode du SMLT « infini ». On rappelle que la valeur « forêt » correspond à la valeur additionnelle, soit la différence entre projet et scénario de référence. Dénomination : **SMLT/LTA « infini » forêt, SMLT/LTA « infini » produits, SMLT/LTA « infini » total**.

8 Méthode pour la transformation du type de sylviculture

Est ici présentée une méthode qui répond aux quatre critères des crédits carbone (cf. chapitre 4) dans le cadre d'une reprise en gestion d'une forêt gérée en sylviculture régulière avec pour volonté de transiter vers une gestion en sylviculture mélangée à couvert continu. Les deux critères principaux à expliciter sont l'additionnalité et la permanence. La permanence est prise en compte grâce aux concepts de SMLT, quant à l'additionnalité il convient de définir quel est le scénario de référence.

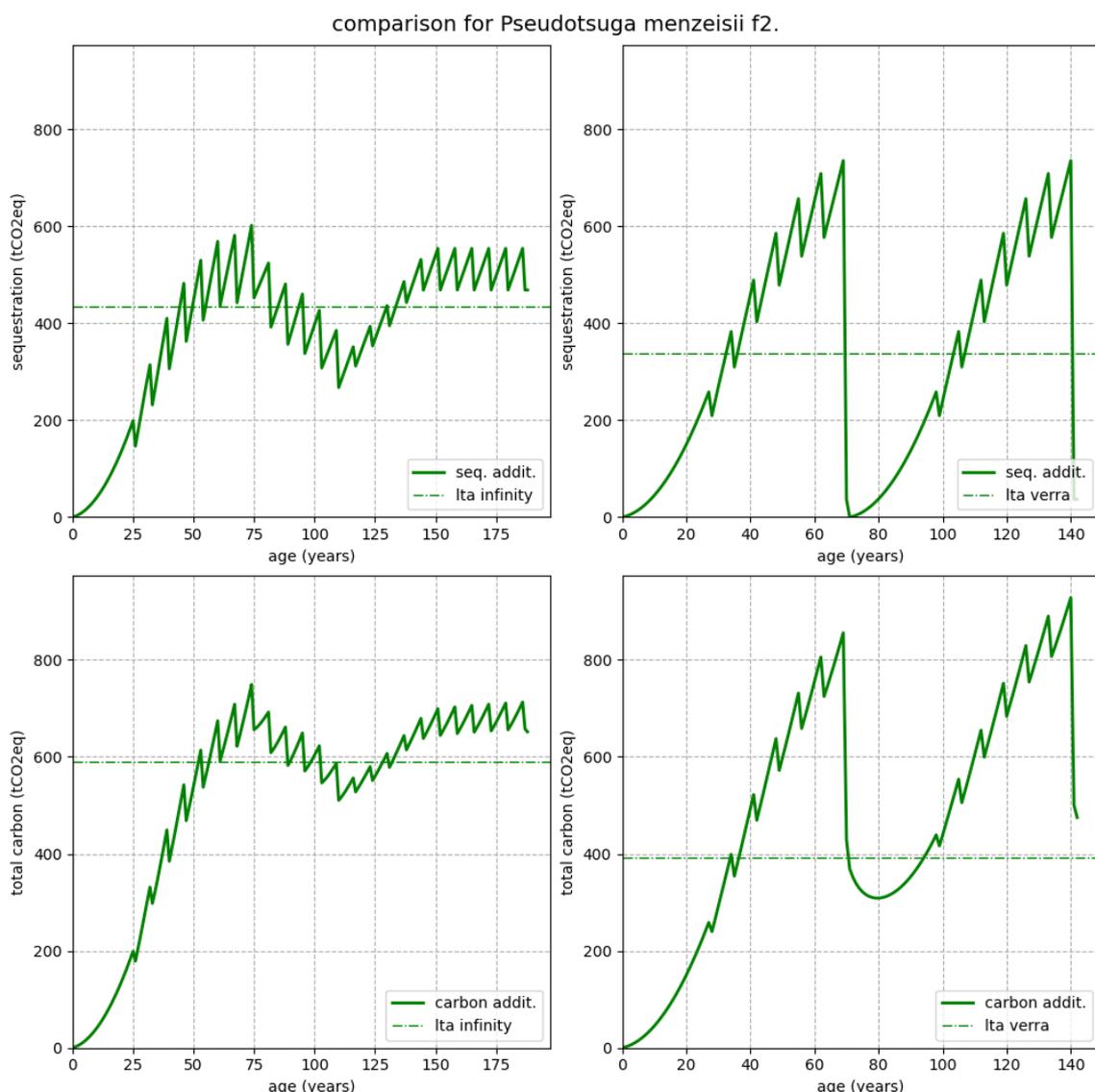


Figure 6: Exemple de comparaison pour Douglas, fertilité 2, avec (en haut) et sans (en bas) les produits bois considérés dans le calcul de carbone. L'enjeu est de quantifier la différence entre les droites en trait mixte pour chacun des couples de graphes.

8.1 Additionnalité

Le scénario de référence est celui d'un maintien de la sylviculture régulière donc une coupe rase prévue à l'âge de maturité économique du peuplement. Il n'y a additionnalité que si le carbone capté par le projet est supérieur à celui capté par le scénario de référence.

8.2 Permanence

Le concept de SMLT n'a de sens que lorsqu'il y a soit un état d'équilibre, soit une répétition d'un motif global dans le modèle descriptif de l'évolution du volume de biomasse en fonction du temps. Il paraît évident sur la figure que ce n'est le cas que lorsque n'est prise en compte que la partie séquestration. En effet, l'impact de la coupe rase sur le stock dans les produits bois ne permet pas de considérer une quelconque stabilité ou répétition de la valeur totale de carbone. Pour cette raison la valeur choisie en terme de carbone additionnel est bien la différence de **SMLT sur la séquestration** entre les deux méthodes de gestion. Dans la mesure où il paraît compliqué, voire illisible, de montrer la différence des deux scénarii puis de calculer le SMLT, il est choisi de faire la différence des deux SMLT calculés comme précédemment décrit. La figure 6 propose l'exemple d'un changement de gestion sur une parcelle d'un hectare de Douglas en fertilité 2.

Le concept même de SMLT induit que l'âge de la reprise en gestion n'influe pas sur le résultat final. Ce qui ne veut pas dire que cela n'implique pas des contraintes ou impossibilités de transformation sur le terrain.

9 Calcul du carbone séquestré dans l'écosystème forestier selon la méthode LBC adaptée à 100 ans

Dans un premier temps, les quantités de carbone séquestrées dans les différents compartiments du peuplement sont calculées ([Gleizes, 2017, Loustau, 2004]).

Le stockage carbone total sur 1 ha à l'instant t est égal à $(ba + br).tc + S_{sol} + S_{lit} + b_{mort}$, exprimé en tMS. Ce résultat est multiplié par 44/12 pour trouver le résultat en tonnes de CO₂ équivalent (TeqCO₂).

En détaillant chaque coefficient :

La biomasse aérienne (ba) :

$$ba = vol.exp_{aero}.infracdensité$$

exprimée en tMS avec :

- vol : volume des tiges des arbres sur pied à l'instant t sur un hectare,
- exp_{aero} : coefficient d'expansion aérienne. Facteur d'expansion « branches » de 1,335 pour les conifères et de 1,611 pour les feuillus, tirés du Label Bas Carbone ou bien de la littérature lorsque l'essence n'apparaît pas dans celui-ci (par exemple pour le Thuya [CIRAD, 2012]),
- $infracdensité$: les valeurs utilisées sont définies par essence [Label Bas Carbone, 2020a].

La biomasse racinaire (br) :

$$br = e^{-1.0587+0.8836.ln(ba)+0.2840}$$

exprimée en tMS ([Label Bas Carbone, 2020a]) sur la base des travaux de [Cairns et al., 1997])

La séquestration totale de carbone dans l'arbre est obtenue en multipliant $(ba + br)$ par t_c (taux de carbone = 0.475 tC/tMS [Eggleston et al., 2006]).

Le stockage de carbone dans le sol :

Il y a ici une différence selon le scénario de référence. Il est considéré que pour une terre agricole, le sol se régénère pour retourner à l'équilibre de 70 tC/ha à partir de 45 tC/ha.

$$S_{sol} = C_{ref} + (C_f - C_{ref}).(1 - e^{-0.0175.t})$$

depuis [Arrouays et al., 2002] p.161. Bien-sûr si $C_{ref} = C_f$ (pour enrichissement ou prairie) alors $S_{sol} = C_{ref} = 70$ tC/ha.

Le stockage de carbone dans la litière :

Le Label Bas Carbone propose que l'équilibre soit atteint à 30 ans. Nous considérons donc que le stock est à l'équilibre par la suite.

$$S_{lit} = \frac{t.(L_{eq} - l_0)}{30}$$

pour $t \leq 30$ ans
 $S_{lit} = L_{eq}$ pour $t > 30$ ans
avec L_{eq} = stock de carbone à l'équilibre = 10 tC/ha.

Le stockage de carbone dans le sous-étage :

Il est considéré que le sous-étage compte pour 2,4 tC/ha pour les feuillus et 6,5 tC/ha pour les résineux [Loustau, 2004]. Ces coefficients ne sont pas implémentés à ce jour dans ces calculs mais apparaissent dans la formalisation des itinéraires techniques irréguliers.

Le stockage de carbone dans le bois mort :

Il est négligé d'après le LBC, donc $b_{mort} = 0$.

Jusqu'à 30 ans cette hypothèse était valide. Elle ne le sera peut-être plus à 100 ans. EcoTree met en œuvre une gestion en sylviculture irrégulière, avec des coupes légères mais plus fréquentes. De plus, par souci pour la biodiversité, 3 ou 4 arbres morts (ou « arbres bio ») sont gardés par hectare. Leur volume est pour l'instant considéré comme négligeable dans le cadre du compartiment bois mort par ces calculs.

10 Calcul du carbone séquestré dans les scénarios de référence

Afin de suivre le critère d'additionnalité, un scénario de référence doit être sélectionné. En effet, « seules les réductions d'émissions allant au-delà de ce scénario de référence sont reconnues dans le cadre du Label », Référentiel du Label Bas Carbone (III.C.1).

Trois scénarios de référence (calculés pour tout t dans la durée du projet) existent : reprise de terre agricole, reprise de prairie ou de pâturage et reprise de friche. Dans le cas où le projet est une reprise de coupe rase (ou coupe à blanc) non reconstituée ou suite à une coupe d'urgence pour dépérissement (associés aux documents justificatifs) le scénario de référence sélectionné est « reprise de friche ».

10.1 Reprise de terre agricole :

Il n'y a pas d'accru en termes de biomasse qui vaut alors 5 tC/ha constante.

Stockage dans le sol : 45 tC/ha.

Il n'y a pas de litière.

Donc la constante de départ est de 50 tC/ha.

10.2 Boisement d'une prairie ou d'un pâturage :

Il n'y a pas d'accru en termes de biomasse : 0 tC/ha constante.

Stockage dans le sol : 70 tC/ha.

Il n'y a pas de litière.

Donc la constante de départ est de 70 tC/ha.

10.3 Boisement d'une terre où il y aurait de la colonisation naturelle/enfrichement :

Il est considéré qu'il y a un accru de biomasse de $1\text{m}^3/\text{ha}/\text{an}$ en démarrant sur une parcelle vide (pâturage ou coupe rase). Sur une période de 30 ans dans le Label Bas Carbone, le scénario de référence resterait exclusivement une friche [Label Bas Carbone, 2020a, Label Bas Carbone, 2020b]. Ici, sur des projets longs (100 ans et plus), la succession écologique aura déjà eu le temps de se mettre en place, la friche devient donc petit à petit une forêt. L'accroissement de $1\text{m}^3/\text{ha}/\text{an}$ reste cohérent. On arrête cependant les accrus de $1\text{m}^3/\text{ha}/\text{an}$ à 75 ans puis on poursuit sur cette valeur stationnaire de $75\text{m}^3/\text{ha}$. Selon les dires d'experts, c'est une valeur raisonnable. Il apparaît en effet probable qu'au delà de 75 ans on arrive à une forêt de type taillis pauvre stable, surtout si elle est utilisée régulièrement pour obtenir du bois de chauffe sur les essences pionnières comme la méthode le stipule lorsqu'elle pose que l'on ne récolte pas de produits bois (calcul du REA produits depuis LBC) hors bois de chauffe dans ce scénario de référence. Donc, pour le compartiment des produits bois, à l'instar du Label Bas Carbone, nous séparons les friches feuillues (bois de chauffe, donc aucun produit bois dans le calcul), et les friches résineuses (bois de trituration, appelé BI dans la présente méthode).

Pour le coefficient d'expansion aérienne nous utilisons une moyenne des coefficients feuillus/résineux (soit respectivement 1.611 et 1.335).

Nous utilisons les formules précédentes de calcul de biomasse avec un stockage dans le sol de 70 tC/ha constant de départ (soit un pâturage qui s'enrichit, soit une coupe rase qui a donc un sol forestier). Pour le stock dans la litière, la formule utilisée est celle adaptée à 100 ans comme précédemment, en effet nous considérons que la litière est soit inexistante soit très endommagée au début du projet.

10.4 Transformation du mode de sylviculture

Le scénario de référence est la gestion en sylviculture régulière et le calcul du carbone suit la même procédure que celui du projet, la différence réside dans l'itinéraire technique utilisé. Nous utilisons les simulations Capsis comme données d'entrée, pour les mêmes essences et classes de fertilité. Les calculs ne se font que pour le compartiment séquestration.

11 Calcul du carbone stocké dans les produits de la filière bois

Selon le diamètre moyen des tiges prélevées, plusieurs catégories de produits sont différenciées. Les quantités de carbone qui y sont stockées et leur durée de stockage en dépendent :

- BO = stock de carbone des produits bois à destination du sciage (bois d'œuvre),
- BI = stock de carbone des produits bois à destination de l'industrie. Deux sous-catégories peuvent être distinguées : le bois pour la pâte à papier (BP = 44 % du BI), les panneaux (BPa = 56 % du BI),
- BE = stock de carbone des produits bois à destination du bois énergie. Aucune REA n'est prise en compte pour le BE.

La méthode de calcul suivante est mise en œuvre pour déterminer la quantité de carbone dans les produits à l'instant t : le carbone (tCO₂eq) extrait lors des années de coupe est calculé, en séparant le volume de bois en bois industrie (BI) et bois d'œuvre (BO) ; les pourcentages de bois de qualité par essence sont issus des travaux du Cemagref-IFN, adaptés pour le Label Bas Carbone [Ginistry et al., 2009, Label Bas Carbone, 2020a]. Nous avons actuellement implémenté une version de ces pourcentages de qualité de bois par essence tirés des hypothèses qualité de l'IFN (cf. Annexe 1, page 20) ; ces pourcentages prennent déjà en compte les 50 % du BO qui passent en BE dû au rendement de sciage [Label Bas Carbone, 2020a].

11.1 Prise en compte des demi-vies :

Pour les années entre les coupes, nous calculons la dégradation du stockage de CO₂ équivalent (équation de demi-vies selon le type : BI = 25 ans, BO = 35 ans, BP = 2 ans ; voir figure 7) des coupes précédentes.

Ceci est calculé pour chaque coupe par :

$$C(n+1) = C(n).e^{-k} \text{ avec } k = \frac{\ln(2)}{t_{demi}} \text{ [Pingoud and Wagner, 2006].}$$

Pour les années de coupe, nous rajoutons les différents pourcentages aux stocks de qualité de bois. Les coupes étant réalisées en fin d'année nous ne tenons pas compte de la dégradation des stocks ajoutés lors de l'année de coupe, mais bien de la dégradation de tous les stocks dans les produits bois des années précédentes. À chaque année t nous recensons donc le stock total de carbone (ici équivalent CO₂) stocké individuellement dans les différents types de produits bois : BE, BP, BI et BO.

12 Calcul des effets de substitution

La substitution concerne les différentes catégories de produits : BE, BI et BO. Les coefficients suivants (Label Bas Carbone, 2020) sont utilisés. En effet, à 100 ans, les distinctions sont permises alors qu'à 30 ans peu d'éclaircies sont prises en compte et des coefficients moyens BE ou BI sont utilisés :

- BO = 1,52

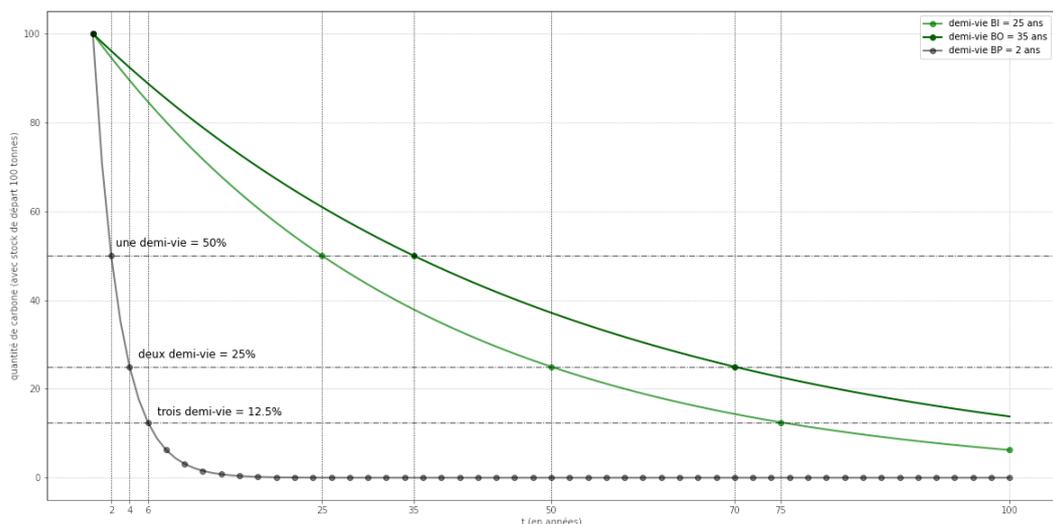


Figure 7: Demi-vies pour les différentes classes de produits bois ; pour l'exemple du bois d'oeuvre, on constate une division par deux du stock de carbone tous les 35 ans, ce qui correspond à sa demi-vie.

- BI = 0 pour le papier (BP = 44 % du BI), 0,77 pour les panneaux (BPa = 56 % du BI)
- BE = 0,25

Il s'agit d'une multiplication du volume de bois en mètre cube extrait lors des éclaircies par les coefficients de substitution [Rüter et al., 2016], en prenant en compte les pourcentages de qualité bois ainsi que les connexes de sciage. Le calcul est effectué par coupe et en cumulatif. Il est cohérent de considérer ces effets de substitution comme cumulatif et définitif pour obtenir un chiffre final global. De même, « la courbe a une forme particulière avec des paliers correspondant à un seuil d'émissions évitées à chaque éclaircie réalisée qui permet de mobiliser du bois supplémentaire à destination de la construction par exemple. » [Gleizes, 2017]

13 Calcul des Réductions d'Emissions Anticipées (REA) générables du fait de la séquestration du carbone par l'écosystème forestier

Les REA forêt sont toujours calculées par rapport à un scénario de référence et sur la totalité de la durée du projet. Pour les calculer, il faut rechercher le minimum entre :

- la différence entre le stockage dans l'écosystème forestier du projet et du stockage du scénario de référence à l'issue du projet (100 ans).
- la différence sur les Stocks à Moyen Long Terme (SMLT) sur la durée du projet.

$$REA_{foret} = \min(\Delta S(100), \frac{1}{R} \cdot \sum_{n=0}^R S_{projet}(n) - \frac{1}{R'} \cdot \sum_{n=0}^{R'} S_{ref}(n))$$

avec :

- $\Delta S(100)$: différence de séquestration de carbone à l'année 100 entre le scénario de projet et le scénario de référence (en tCO₂eq),
- S_{projet} : la séquestration de carbone dans les compartiments forestiers du scénario de projet (en tCO₂eq),
- S_{ref} : la séquestration de carbone dans les compartiments du scénario de référence, (en tCO₂eq),
- R : durée de révolution de l'essence de projet,
- R' : durée de révolution du scénario de référence. Si l'âge d'exploitabilité des accrus n'est pas connu, on appliquera le même âge que pour le scénario de projet, par conséquent R = R'.

14 Calcul des REA générables du fait du stockage du carbone dans les produits de la filière bois

Comme pour les REA générables grâce à la séquestration, ces REA dues au stockage de carbone dans les produits bois sont calculées à la fin du projet.

La valeur est calculée selon la formule ci-dessous, sur la durée du projet (100 ans). On utilise les différences de stockage du carbone dans les produits bois entre le projet et le scénario de référence. Dans les cas de reprise de terrain agricole ou prairies/pâturage, il n'y a bien sûr pas de produits bois. Dans le cas d'un enrichissement, nous considérons que la parcelle est exploitée en taillis donc il n'y a pas non plus de produits bois de type bois d'oeuvre. La formule du REA produit est la suivante :

$$REA_{produits} = \frac{1}{100} \cdot \sum_{n=0}^{100} (C_{projet}(n) - C_{ref}(n))$$

avec :

- C_{projet} : stock de carbone dans les produits bois qui seraient récoltés dans le scénario de projet (en tCO₂eq),
- C_{ref} : stock de carbone dans les produits bois qui seraient récoltés dans le scénario de référence (en tCO₂eq).

15 Calcul des Réductions d'Emissions Indirectes (REI) générables

Elles sont calculées de même à la fin du projet. Cette fois, c'est le cumul sur la durée du projet (100 ans) des différences de stockage du carbone dans les produits bois entre le projet et le scénario de référence qui est calculé.

$$REI = CS \cdot \frac{1}{100} \cdot \sum_{n=0}^{100} (Flux_{projet}(n) - Flux_{ref}(n))$$

avec :

- $Flux_{projet}$: volume de bois dans les produits bois qui seraient récoltés dans le scénario de projet (en m³), par type de produits bois,
- $Flux_{ref}$: volume de bois dans les produits bois qui seraient récoltés dans le scénario de référence (en m³), pour les mêmes raisons que précédemment, dans le cas friche et par type d'essence (feuillus ou résineux) : le coefficient pour les feuillus est celui du bois de chauffe, celui pour les résineux celui pour le bois industrie [Label Bas Carbone, 2020a]
- CS : coefficients de substitution

Nous considérons que ces chiffres sont purement indicatifs et ne sauraient être utilisés autrement que comme communication/pédagogie pour changer les pratiques de consommation, etc. Ils ne sont donc pas ajoutés au REA comme dans les méthodes du Label Bas Carbone.

16 Limites

EcoTree attire néanmoins l'attention de chacun sur le fait :

- que le monde du vivant étant par définition difficilement quantifiable, cette méthodologie de captation du carbone d'EcoTree est par essence une estimation et en aucun cas une mesure juste et parfaite, et ce pour les raisons suivantes :
 - (i) elle est elle-même basée sur notre méthodologie d'itinéraires sylvicoles ; méthodologie nouvelle pour une forêt résiliente, théoriquement juste, mais que le monde du vivant et les aléas naturels (notamment le réchauffement climatique) pourraient modifier ;
 - (ii) elle est réalisée *ex-ante*, c'est-à-dire que cette estimation est issue d'une vision prospective de la croissance des peuplements et de leur séquestration de carbone. Ainsi, elle permet de cadrer le puits de carbone que la forêt est susceptible de créer tout au long du cycle en question ;
 - (iii) par conséquent, les chiffres sont arrondis à la tonne de CO₂ équivalent ;

-
- (iv) par ailleurs, une mesure *ex-post* réalisée par EcoTree et ses équipes permettra de préciser la captation de carbone effective, année après année ;
- que toute action ayant pour but de contribuer à la création de puits de carbone n'a de sens que si elle s'inscrit dans une démarche plus globale incluant évitement et réduction ;
 - qu'envisager l'engagement en forêt pour sa seule capacité de séquestration et de stockage de carbone pourrait favoriser le développement d'une gestion peu durable et respectueuse de l'environnement et de sa biodiversité.

17 Références

- [Arrouays et al., 2002] Arrouays, D., Balesdent, J., Germon, J.-C., Jayet, P.-A., Soussane, J.-F., and Stengel, P. (2002). Stocker du carbone dans les sols agricoles de France ? (expertise scientifique collective) inra.
- [Cairns et al., 1997] Cairns, M., Brown, S., Helmer, E., and Baumgardner, G. (1997). Root biomass allocation in the world's upland forests. *Oecologia*, 11(1):1–11.
- [Canada Forest Service, 2023] Canada Forest Service (2023). Glossaire de sylviculture. <https://cfs.nrcan.gc.ca/termes>. dernier accès : Novembre 2023.
- [CIRAD, 2012] CIRAD (2012). Western red cedar's datasheet (page 1). <https://tropix.cirad.fr/FichiersComplementaires/EN/Tempered/WESTERN%20RED%20CEDAR.pdf>. dernier accès : Novembre 2023.
- [CIRAD, 2023] CIRAD (2023). Logiciel capsis : Croissance d'arbres en peuplement avec simulation d'itinéraires sylvicoles. <http://capsis.cirad.fr/>. dernier accès : Novembre 2023.
- [Eggleston et al., 2006] Eggleston, H., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T., and Tanabe, K. (2006). Lignes directrices 2006 du giec pour les inventaires nationaux de gaz à effet de serre, préparé par le programme pour les inventaires nationaux de gaz à effet de serre. <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/french/index.html>. dernier accès : Novembre 2023.
- [Ginistry et al., 2009] Ginistry, C., Chevalier, H., Vallet, P., and Colin, A. (2009). Évaluation des volumes de bois mobilisables à partir des données de l'ifn (nouvelle méthode — actualisation 2009 de l'étude biomasse disponible de 2007). convention cemagref-ifn-dgfar. https://inventaire-forestier.ign.fr/IMG/pdf/rapport_biomasse-2009vf.pdf.
- [Gleizes, 2017] 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.
- [Label Bas Carbone, 2020a] Label Bas Carbone (2020a). Méthode de boisement, version 2. <https://label-bas-carbone.ecologie.gouv.fr/la-methode-boisement>. dernier accès : Septembre 2022.
- [Label Bas Carbone, 2020b] Label Bas Carbone (2020b). Méthode reconstitution de peuplements forestiers dégradés, version 2. <https://label-bas-carbone.ecologie.gouv.fr/la-methode-reconstitution-de-peuplements-forestiers-degrades>. dernier accès : Septembre 2022.
- [Loustau, 2004] Loustau, D. (2004). apport final du projet carbofor, séquestration de carbone dans les grands écosystèmes forestiers en France. quantification, spatialisation, vulnérabilité et impacts de différents scénarios climatiques et sylvicoles.
- [Pingoud and Wagner, 2006] Pingoud, K. and Wagner, F. (2006). Methane emissions from landfills and carbon dynamics of harvested wood products: The first-order decay revisited, mitigation and adaptation strategies for global change. *Mitig Adapt Strat Glob Change*, 11:961–978.
- [ProSilva, 2013] ProSilva (2013). Application de la sicpn aux différentes essences. https://prosilva.fr/files/brochure_Poster_ESSENCES.pdf. dernier accès : Novembre 2023.
- [Rüter et al., 2016] Rüter, S., Werner, F., and Forsell, N. (2016). Climate benefits of material substitution by forest biomass and harvested wood products: Perspective 2030' final report. https://www.researchgate.net/publication/326326498_ClimWood2030_%27Climate_benefits_of_material_substitution_by_forest_biomass_and_harvested_wood_products_Perspective_2030%27_Final_Report. dernier accès : Novembre 2023.
- [Verra, 2018] Verra (2018). Vcs guidance for harvesting scenarios. https://verra.org/wp-content/uploads/2018/03/VCS-Guidance-Harvesting-Examples_0.pdf. dernier accès : Novembre 2023.

18 Annexes

18.1 Annexe 1 — Pourcentages des différentes qualités de bois

Nous sélectionnons ces pourcentages selon les diamètres (selon l'IFN), données modifiées pour prendre en compte les hypothèses du LBC (50 % des sciages de BO perdu, passé en BE).

https://inventaire-forestier.ign.fr/IMG/pdf/rapport_biomasse-2009vf.pdf

Données modifiées pour prendre en compte les hypothèses du LBC (50% des sciages de BO perdu en BE)

CHENE				SAPIN + EPICEA COMMUN			
Dg (cm)	BE	BI	BO	Dg (cm)	BE	BI	BO
< 27,5	0%	100%	0%	< 22,5	5%	90%	5%
[27,5 - 47,5[35%	30%	35%	≥ 22,5	40%	20%	40%
≥ 47,5	45%	10%	45%				

HETRE				PIN SYLVESTRE + PIN MARITIME + AUTRES RESINEUX			
Dg (cm)	BE	BI	BO	Dg (cm)	BE	BI	BO
< 27,5	0%	100%	0%	< 22,5	0%	100%	0%
[27,5 - 47,5[30%	40%	30%	≥ 22,5	35%	30%	35%
≥ 47,5	45%	10%	45%				

AUTRES FEUILLUS			
	BE	BI	BO
∇ Dg	25%	50%	25%

18.2 Annexe 2 — Evolutions de la méthode

La méthodologie EcoTree en est à sa quatrième version majeure, ci-après un rappel des principales étapes :

- Version 1 — adaptation du Label Bas Carbone aux projets sylvicoles à 100 ans d'EcoTree.
- Version 2.x — mise à jour à partir de la version 2020 du Label Bas Carbone et adaptation de la méthode aux itinéraires irréguliers, recherche de coefficients d'expansion aérienne et d'infradensité pour les essences non disponibles dans le document officiel du Label Bas Carbone.
- Version 3.x — ajout de la partie sur le clause de permanence et des explications sur les concepts de LTA et SMLT, changement de la durée avant stabilisation pour le scénario de friche, création de la métrique « LTA infini ».
- Version 4 (présente version) — ré-écriture afin de présenter la méthode de création des itinéraires sylvicoles et centrer sur l'adaptation de la méthode aux critères fondamentaux des crédits carbone. Ajout d'une proposition de méthode pour le changement de gestion sylvicole (régulier vers irrégulier). Ajout de l'annexe 3 qui précise la procédure de validation.

18.3 Annexe 3 — Procédure de vérification par Bureau Veritas

Cette présente annexe détaille les points techniques lors de la vérification des calculs de carbone par Bureau Veritas : les écarts tolérés, les éléments à transmettre pour valider la recevabilité, la liste des métriques à vérifier, etc.

- Éléments à transmettre :
 - Un fichier Excel avec l'itinéraire de chaque parcelle de la forêt (on rappelle qu'une forêt est composée d'une ou plusieurs parcelles qui chacune comporte un itinéraire technique (essence + classe de fertilité), une surface et un scénario de référence).
 - Une attestation d'un expert forestier pour l'ensemble de la forêt (si certaines parcelles ne sont pas éligibles pour l'obtention de carbone additionnel cela sera clairement précisé sur l'attestation).

-
- Un fichier texte ou csv contenant les résultats des calculs effectués par EcoTree (voir plus bas le détail des métriques calculées pour la vérification).
 - Un bon de commande (avec un maximum de cinq (5) forêts à vérifier par envoi).
 - Éléments devant apparaître sur l'attestation afin de vérifier l'adéquation avec les fichiers Excel fournis par parcelle : essence et classe de fertilité, année d'éclaircie, volume avant et après coupe, volume de l'éclaircie. Une colonne économique apparaît aussi car l'expert porte un avis aussi sur ces valeurs ; surface, scénario de référence. Chaque attestation comporte une conclusion de l'expert sur le bien fondé des itinéraires proposés.
 - Lorsque l'on note des écarts entre les valeurs calculées par EcoTree et Bureau Veritas : dans le cas où Bureau Veritas trouve une valeur de moins de 5 tCO₂eq. supérieure à celle de EcoTree, prendre la valeur d'EcoTree ; dans le cas où bureau Veritas trouve une valeur de plus de 5 tCO₂eq. supérieure à celle de EcoTree, refaire la vérification ; dans le cas où Bureau Veritas trouve une valeur inférieure à celle d'EcoTree et que la différence ne dépasse pas 5 tCO₂eq., c'est la valeur de Bureau Veritas qui est sélectionnée ; dans le cas où Bureau Veritas trouve une valeur inférieure à celle de EcoTree qui dépasse 5 tCO₂eq., refaire la vérification.
 - Les valeurs finales apparaissant sur l'attestation sont arrondies à la tonne équivalente de dioxyde de carbone (tCO₂eq.).
 - Liste des métriques permettant de comparer les calculs :
 - Calcul bilan de séquestration et stockage carbone additionnel (tCO₂eq.) (avec les détails : Séquestration du projet (tCO₂eq.), Séquestration du scénario de référence (tCO₂eq.), Stock dans les produits bois (tCO₂eq.))
 - Calcul REA forêt (tCO₂eq.) (avec les détails : SMLT, DeltaStock à 100 ans),
 - Calcul REA produits (tCO₂eq.) (idem avec les détails),
 - Calcul REA total (tCO₂eq.),
 - Calcul effets de substitution (tCO₂eq.) = REI total
 - Calcul SMLT/LTA « infinity » forêt (tCO₂eq.) (avec les détails : SMLT/LTA « infinity » du projet, SMLT/LTA « infinity » du scénario de référence)
 - Calcul SMLT/LTA « infinity » produits (tCO₂eq.)
 - Calcul SMLT/LTA « infinity » total (tCO₂eq.) = LTA inf
 - — Attention — lors du calcul des valeurs « infinity », on utilise le dixième motif à partir de la stabilisation du volume sur la partie régime permanent de l'itinéraire.
 - Les métriques apparaissant sur l'attestation de Bureau Veritas sont les suivantes (avec détail par parcelle) :
 - (i) Bilan de séquestration et stockage carbone additionnel à 100 ans
 - (ii) Réductions d'Émissions Anticipées (REA) générables totales à 100 ans
 - (iii) Réduction d'Émissions Indirectes (REI) générables totales à 100 ans
 - (iv) SMLT/LTA « infinity » total
 - Il est rappelé que l'attestation de vérification sera envoyée dans un délai de quinze (15) jours à partir de la date de validation de la recevabilité.