
Evaluation de l'influence de la sylviculture sur le bilan carbone de la filière forêt-bois wallonne

Auteur : Charles, Guillaume

Promoteur(s) : Ligot, Gauthier; De Mil, Tom

Faculté : Gembloux Agro-Bio Tech (GxABT)

Diplôme : Master en bioingénieur : gestion des forêts et des espaces naturels, à finalité spécialisée

Année académique : 2022-2023

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/18242>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.

EVALUATION DE L'INFLUENCE DE LA SYLVICULTURE SUR LE BILAN CARBONE DE LA FILIERE FORET-BOIS WALLONNE

GUILLAUME CHARLES

**TRAVAIL DE FIN D'ETUDES PRESENTE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE
MASTER BIOINGENIEUR EN GESTION DES FORETS ET DES ESPACES NATURELS**

ANNEE ACADEMIQUE 2022-2023

(CO)-PROMOTEUR(S): TOM DE MIL & GAUTHIER LIGOT

© Toute reproduction du présent document, par quelque procédé que ce soit, ne peut être réalisée qu'avec l'autorisation de l'auteur et de l'autorité académique de Gembloux Agro-Bio Tech.

Le présent document n'engage que son auteur.

EVALUATION DE L'INFLUENCE DE LA SYLVICULTURE SUR LE BILAN CARBONE DE LA FILIERE FORET-BOIS WALLONNE

GUILLAUME CHARLES

**TRAVAIL DE FIN D'ETUDES PRESENTE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE
MASTER BIOINGENIEUR EN GESTION DES FORETS ET DES ESPACES NATURELS**

ANNEE ACADEMIQUE 2022-2023

(CO)-PROMOTEUR(S): TOM DE MIL & GAUTHIER LIGOT

Remerciements

J'aimerais tout d'abord adresser mes remerciements à mes deux co-promoteurs, les professeurs Tom De Mil et Gauthier Ligot, pour leur accompagnement tout au long de ce mémoire. Merci pour votre suivi, votre disponibilité, vos conseils et vos commentaires.

Je souhaiterais aussi remercier les professeurs Arnaud Monty, Jeroen Meersmans, Benoît Jourez et son remplaçant Mr Thibaut Masy, d'avoir accepté de lire mon mémoire et de faire partie des membres du jury.

Ensuite, je tiens également à remercier tous les spécialistes de la filière bois wallonne qui ont accepté de répondre à mes questions. Caractériser la filière bois wallonne est une tâche complexe qui ne peut être menée à bien qu'avec l'aide des spécialistes et des entreprises de la filière et je suis donc particulièrement reconnaissant envers toutes les personnes qui ont accepté de prendre un peu de leur temps pour m'aider à mener à bien ce mémoire.

Je remercie aussi tout particulièrement Mathieu Fortin, le développeur du logiciel de comptabilité carbone utilisé, d'avoir accepté de répondre à mes questions mais aussi pour son travail efficace d'adaptation du logiciel aux besoins de l'étude.

Enfin, merci à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce mémoire, par leur relecture (mes grands-parents, Marie et Benjamin), par leurs conseils et leur aide ou par leur simple présence.

Résumé

L'augmentation de la concentration en dioxyde de carbone (CO₂) dans l'atmosphère terrestre attire l'attention vers les forêts et les produits bois pour le rôle qu'ils peuvent jouer dans le stockage du carbone et dans l'évitement d'émissions de CO₂ par effet de substitution. Il subsiste cependant de grandes incertitudes quant à la stratégie à favoriser pour optimiser le bilan carbone du secteur forestier. C'est notamment le cas pour la sylviculture, dont l'impact sur le bilan carbone est étroitement lié au contexte environnemental et climatique local. Dans cette étude, la filière bois wallonne a été caractérisée afin de pouvoir étudier, avec le logiciel de comptabilité carbone CAT, comment des changements au niveau de la sylviculture peuvent impacter le bilan carbone du secteur forestier en Wallonie.

Dans un premier temps, des informations sur les produits bois et sur les flux de matière au sein de la filière bois wallonne ont été collectées et intégrées dans le logiciel CAT. Ensuite, une futaie pure équienne d'épicéa commun (*Picea abies* (L.) H. Karst) et une hêtraie jardinée ont été simulées à l'aide des modèles Gymnos et Walsi de la plateforme CAPSIS4 (*Computer-aided projection of strategies in silviculture*). Les deux peuplements ont été comparés sur base des stocks de carbone moyens en séquence infinie et de l'effet de substitution. Enfin, dix pessières régulières, contrastées au niveau du scénario sylvicole, ont également été simulées avec le modèle Gymnos et comparées sur base des stocks de carbone moyens en séquence infinie et de l'effet de substitution. Les dix scénarios résultent de la combinaison de (1) cinq longueurs de révolution (58, 70, 82, 88 et 100 ans) et (2) de deux régimes d'éclaircies (un régime conventionnel avec éclaircies et un régime sans éclaircies jusqu'à la mise à blanc).

Pour un même volume de bois exploité, la valorisation des essences résineuses permet de stocker plus de carbone dans les produits bois et d'éviter plus d'émissions de CO₂ par effet de substitution que la valorisation des essences feuillues. De manière générale, les produits issus de la transformation du bois d'essences feuillues ont une durée de vie plus courte et un facteur de substitution inférieur à celui des produits issus de la transformation du bois d'essences résineuses. Pour une même superficie exploitée, ce contraste entre feuillus et résineux est encore plus marqué. Les résultats obtenus indiquent qu'en moyenne, le stock de carbone dans les produits bois et l'effet de substitution sont plus élevés pour la pessière régulière que pour la hêtraie jardinée (de respectivement 102.4 tC/ha et de 3,66 tC/(ha.an)). Par ailleurs, le stock de carbone dans la biomasse vivante et dans la matière organique morte est supérieur de 5,7 tC/ha pour la pessière régulière. Avec une telle différence dans la valorisation du bois, le remplacement des pessières régulières par des essences feuillues n'est pas favorable pour le bilan carbone, pour autant que l'influence du changement climatique et que le risque de dégâts biotiques et abiotiques (non pris en compte ici) restent limités.

Pour les peuplements résineux, augmenter la longueur de révolution est une mesure favorable pour le stock total de carbone. Par rapport au scénario de gestion conventionnel, les scénarios de gestion sans éclaircies jusqu'à la mise à blanc permettent de stocker plus de carbone, mais d'éviter moins d'émissions de CO₂ par effet de substitution. Toutefois, compte tenu des risques de dégâts plus importants associés aux longues révolutions, particulièrement pour les peuplements non éclaircis, il semble peu probable qu'un changement dans la longueur de révolution ou dans le régime d'éclaircies par rapport au scénario de gestion conventionnel des pessières régulières puisse être favorable pour le bilan carbone, même à court terme.

Abstract

The rising concentration of carbon dioxide (CO₂) in the atmosphere of the earth has drawn attention to the carbon sequestration potential of forests and harvested wood products, as well as to their benefits in avoiding fossil fuel emissions due to the substitution effect. However, there is still considerable uncertainty as to the best strategy for optimizing the carbon balance of the forestry sector. This is particularly true for forest management, whose impact on the carbon balance is closely linked to the local environmental and climatic context. In this study, the Walloon wood sector was characterized to study, with the Carbon Accounting Tool (CAT), how changes in forest management can impact the carbon balance.

Firstly, data on wood products and material flows within the Walloon wood sector were collected and integrated into the CAT software. Next, a pure even-aged Norway spruce (*Picea abies* (L.) H. Karst) stand and an uneven-aged European beech (*Fagus sylvatica* L.) stand were simulated using the models Gymnos and Walsi from the Computer-aided projection of strategies in silviculture (CAPSIS4) platform. Both stands were compared in terms of their average carbon stocks over an infinite time horizon, as well as their substitution effect. Finally, ten even-aged spruce stands, with contrasting management scenarios, were also simulated using Gymnos and compared in terms of their average carbon stocks over an infinite time horizon and their substitution effect. The ten scenarios were contrasted in terms of (i) rotation length (58, 70, 82, 88 and 100 years) and (ii) the thinning regime (the conventional thinning regime and a no thinning with final felling regime).

For a same volume of wood harvested, the use of softwood species enables more carbon to be stored in wood products and more CO₂ emissions to be avoided through substitution than the use of hardwood species. Generally, products made from hardwood species have a shorter lifespan and a lower substitution factor than products made from softwood species. For a same harvested area, the contrast between hardwood and softwood species is even more marked. The results showed that, on average, the carbon stock in wood products and the substitution effect are higher for the even-aged spruce stand than for the European beech stand (102.4 tC/ha and 3.66 tC/(ha.yr) respectively). The carbon stock in the living biomass and the dead organic matter is 5.7 tC/ha higher in the even-aged spruce stand. With such a difference in wood use, replacing even-aged spruce stands with hardwood stands is not favourable for the carbon balance, as long as the influence of climate change and the risk of biotic and abiotic damage (not taken into account here) remain limited.

For softwood stands, increasing rotation length is favourable to carbon sequestration. Compared with the conventional management scenario, scenarios without thinnings until clear-cutting enable more carbon to be stored, but less CO₂ emissions to be avoided through substitution. However, given the higher risk of damage associated with long rotations, particularly for unthinned stands, it seems unlikely that a change in rotation length or in the thinning regime compared with the conventional management scenario would be favourable for the carbon balance of even-aged spruce stands, even in the short term.

Table des matières

1.	Introduction	1
1.1.	Contexte	1
1.2.	Influence du secteur forestier sur la concentration en GES dans l'atmosphère	2
1.2.1.	Notions préliminaires	2
1.2.2.	Quelle stratégie choisir pour optimiser le bilan carbone du secteur forestier ?	5
1.2.3.	Utilisation des produits bois	6
1.2.4.	Gestion forestière.....	7
1.3.	Bilan et questions de recherche	9
2.	Matériel et méthodes	10
2.1.	Logiciel de comptabilité carbone : CAT (<i>Carbon Accounting Tool</i>).....	10
2.1.1.	Justification du choix	10
2.1.2.	Description du logiciel	10
2.2.	Collecte des données	13
2.2.1.	Paramètres de la biomasse et durées de vie moyennes de la litière et du bois mort .	13
2.2.2.	Modèle de billonnage.....	13
2.2.3.	Propagation de l'incertitude	13
2.2.4.	Caractérisation de la filière bois wallonne.....	14
2.3.	Description des cas étudiés	16
2.3.1.	Caractérisation de la filière bois wallonne.....	16
2.3.2.	Comparaison du bilan carbone d'une pessière et d'une hêtraie jardinée	16
2.3.3.	Influence du scénario sylvicole sur le bilan carbone des pessières régulières	18
3.	Résultats.....	19
3.1.	Caractérisation de la filière bois wallonne	19
3.2.	Comparaison du bilan carbone d'une pessière régulière et d'une hêtraie jardinée	23
3.3.	Influence du scénario sylvicole sur le bilan carbone des pessières régulières.....	25
4.	Discussion.....	29
4.1.	Caractérisation de la filière bois wallonne	29
4.2.	Comparaison du bilan carbone d'une pessière régulière et d'une hêtraie jardinée	31
4.3.	Influence du scénario sylvicole sur le bilan carbone des pessières régulières.....	33
4.4.	Perspectives.....	35
4.5.	Contribution personnelle de l'étudiant.....	36
5.	Conclusion.....	37
6.	Bibliographie	38
7.	Annexes.....	42

7.1.	Annexe 1 : Informations supplémentaires sur le logiciel CAT	42
7.2.	Annexe 2 : Les 22 espèces ou catégories d'espèces du modèle Walsi	44
7.3.	Annexe 3 : Table de production utilisée pour les pessières pures équiennes.....	45
7.4.	Annexe 4 : Informations supplémentaires sur la hêtraie jardinée	46
7.5.	Annexe 5 : Informations supplémentaires sur la simulation des pessières	47
7.6.	Annexe 6 : Informations supplémentaires sur les valeurs du tableau 5	48
7.7.	Annexe 7 : Informations supplémentaires sur les valeurs de la figure 5	53
7.8.	Annexe 8 : Répartition du bois récolté entre les catégories de produits.....	57
7.9.	Annexe 9 : Description du matériel supplémentaire	58

Table des abréviations

- BTL
- C
- CAT
- CCNUCC (UNFCCC)
- CH₄
- CO₂
- DBTL
- DF
- E
- FS (SF)
- GES
- GIEC (IPCC)
- LULUCF
- MDF
- SE
- UF
- Modèle de billonnage BasicTreeLogger
- Carbone
- Logiciel de comptabilité carbone (*Carbon Accounting Tool*)
- Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques
- Méthane
- Dioxyde de carbone
- Modèle de billonnage CATDiameterBasedTreeLogger
- Facteur de déplacement (*Displacement Factor*)
- Scénario sylvicole avec des éclaircies
- Facteur de substitution (*Substitution Factor*).
- Gaz à effet de serre
- Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
- Secteur *Land Use, Land Use Change and Forestry*
- *Medium Density Fiberboard*
- Scénario sylvicole sans éclaircies
- Unité fonctionnelle

1. Introduction

1.1. Contexte

Selon le groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), il est « extrêmement probable »¹ que les activités anthropiques (et notamment les émissions de gaz à effet de serre (GES)) soient la cause dominante du réchauffement climatique observé depuis le milieu du 20^{ème} siècle (IPCC, 2013). Entre 1850 et 2019, $2\,400 \pm 240$ GtCO₂ ont été émises dans l'atmosphère (émissions nettes cumulées). Pour limiter l'augmentation de la température à 1,5°C par rapport à l'ère préindustrielle, le GIEC considère que le budget carbone restant est d'approximativement 500 GtCO₂ (IPCC, 2022). L'accord de Paris met en avant la gestion forestière comme un moyen pour diminuer la concentration en CO₂ dans l'atmosphère et limiter le réchauffement climatique (UNFCCC, 2015).

Conformément à la Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques (CCNUCC), les pays industrialisés, aussi appelés pays de l'annexe 1, sont tenus de faire un rapport annuel sur leurs émissions de GES (UNFCCC, 2014, cité par Pichancourt *et al.*, 2018). Même si le GIEC propose une méthodologie en publiant et en mettant à jour régulièrement des lignes directrices, l'évaluation des émissions de GES reste particulièrement complexe. L'utilisation de logiciels de comptabilité carbone peut dès lors s'avérer particulièrement intéressante (Fortin *et al.*, 2012 ; Pichancourt *et al.*, 2018). Pour le secteur « *Land use, land-use change and forestry* » (LULUCF), l'un des cinq secteurs concernés par l'évaluation annuelle des GES et définis par la CCNUCC², de nombreux outils de comptabilité carbone ont été développés (Pichancourt *et al.*, 2018). Certains d'entre eux sont directement construits sur base des lignes directrices du GIEC. Leur utilisation sort cependant du cadre des rapports nationaux prévus par la CCNUCC. En effet, de nombreux chercheurs tirent profit de ces logiciels, ou au moins des lignes directrices du GIEC, pour évaluer, de manière rigoureuse et transparente, l'impact que le secteur forestier³ peut avoir sur la concentration en GES dans l'atmosphère (voir par exemple Hiltunen *et al.*, 2021 ; Király *et al.*, 2022 ; Martes & Köhl, 2022 ; Pichancourt *et al.*, 2018 ; Zhang *et al.*, 2019).

¹ Probabilité de 95 à 100%.

² Les quatre autres secteurs sont : « *Energy* », « *Industrial processes and product use* », « *Agriculture* » et « *Waste* ».

³ Le secteur forestier n'est pas un secteur au sens de la CCNUCC, mais l'utilisation de ce vocable permet de considérer à la fois l'écosystème forestier et les produits bois qui, ensemble, forment un même domaine d'étude (Geng *et al.*, 2017).

1.2. Influence du secteur forestier sur la concentration en GES dans l'atmosphère

1.2.1. Notions préliminaires

Le secteur forestier peut influencer significativement la concentration des GES dans l'atmosphère (IPCC, 2022 ; Geng *et al.*, 2017 ; Schulze *et al.*, 2020). Par la photosynthèse, les forêts absorbent du CO₂ de l'atmosphère et stockent le carbone initialement dans la biomasse vivante, puis dans la matière organique morte et dans le sol. Si une gestion forestière visant à récolter du bois est pratiquée, le carbone initialement contenu dans la biomasse vivante peut être, en partie et momentanément, stocké dans les produits issus de la transformation de ce bois. En fin de vie, les produits bois peuvent être réutilisés, recyclés, brûlés ou déposés en décharge. Par la combustion ou la dégradation par des facteurs biotiques et abiotiques, le carbone stocké dans les produits bois ou dans la matière organique morte est relargué dans l'atmosphère (Geng *et al.*, 2017). En outre, les produits bois peuvent être utilisés à la place de matériaux alternatifs non biosourcés. Lorsque les émissions de CO₂ liées au cycle de vie du matériau alternatif sont plus élevées que pour le produit bois, des émissions de CO₂ sont alors théoriquement évitées ; c'est l'effet de substitution matérielle du bois. De manière similaire, le bois peut être valorisé en énergie à la place de combustibles fossiles ; c'est l'effet de substitution énergétique du bois (Fortin *et al.*, 2012 ; Sathre & O'Connor, 2010).

En accord avec ceci, il existe plusieurs stratégies, au niveau du secteur forestier, pour réduire les émissions et/ou pour augmenter la séquestration du CO₂ atmosphérique. Selon le GIEC (IPCC, 2007), celles-ci peuvent être regroupées dans les deux grandes catégories suivantes :

- Accroître (ou au minimum maintenir), à l'échelle du site et du paysage, la superficie forestière ainsi que la quantité de carbone stockée dans l'écosystème forestier ;
- Augmenter le stock de carbone en dehors de la forêt grâce aux produits bois et favoriser la substitution matérielle et énergétique.

En d'autres termes, la gestion forestière peut soit chercher à augmenter les stocks de carbone en forêt, en diminuant (voire en arrêtant) la récolte, soit chercher à augmenter le stock de carbone dans les produits bois et à maximiser l'effet de substitution (Martes & Köhl, 2022). Cette manière de présenter les deux grandes stratégies met l'accent sur leur caractère apparemment opposé, tel qu'il apparaît parfois dans la littérature (voir par exemple Schulze *et al.*, 2020). Avant d'aborder ces deux grandes stratégies de manière plus détaillée, il convient de développer au préalable quelques aspects.

Les différents stocks et flux à prendre en compte

Pour une évaluation la plus rigoureuse possible du bilan carbone du secteur forestier, et a fortiori pour une comparaison de stratégies, il convient de prendre en compte tous les stocks et flux qui sont susceptibles d'influencer ce bilan carbone. Au niveau des stocks, les réservoirs de carbone à considérer sont la biomasse vivante, la matière organique morte, le sol et les produits bois. Au niveau des flux, il s'agit des émissions de CO₂ liées à la récolte, au transport et à la transformation du bois, des émissions de CO₂ évitées par effet de substitution et des émissions de méthane (CH₄) et de CO₂ liées à la décomposition du bois en décharge (Baul *et al.*, 2020 ; Chen *et al.* 2008 ; Fehrenbach *et al.*, 2022 ; Hiltunen *et al.*, 2021 ; Klein *et al.*, 2013 ; Martes & Köhl, 2022 ; Pichancourt *et al.*, 2018 ; Verkerk *et al.*, 2022).

En pratique, le carbone du sol est souvent exclu de l'évaluation, lorsque deux stratégies de gestion forestière sont comparées. En absence de données et si l'occupation du sol n'est pas modifiée, le GIEC

suggère d'ailleurs de considérer que le contenu en carbone du sol est constant, ce qui revient à considérer qu'il n'est pas influencé par la gestion forestière (IPCC, 2006).

Plusieurs études (voir par exemple Chen *et al.*, 2008 ; Schulze *et al.*, 2020 et Vallet *et al.*, 2009) ne tiennent également pas compte de certains flux, généralement par manque de temps ou de données. Toutefois, même dans ce cas, les flux ignorés sont mentionnés et les auteurs suggèrent d'en tenir compte pour une potentielle amélioration de leur étude. Ainsi, en faisant abstraction du stock de carbone dans le sol, il semble qu'une comparaison rigoureuse⁴ entre deux stratégies de gestion forestière implique de prendre en compte l'ensemble des stocks et des flux mentionnés ci-dessus⁵.

La prise en compte des différents stocks et flux cités précédemment implique de faire abstraction de la séparation en secteurs présentée à la section 1.1. Dans les rapports nationaux, les émissions de CO₂ évitées par substitution matérielle doivent être prises en compte dans le secteur « *Industrial processes and product use* ». De manière similaire, les émissions de CO₂ évitées par substitution énergétique sont comptabilisées dans le secteur « *Energy* » (IPCC, 2006 ; Schulze *et al.*, 2020). Dans le secteur LULUCF, seules les émissions de CO₂ liées à la récolte de bois sont prises en compte. Cette séparation en secteurs est importante pour éviter les problèmes de double comptage (IPCC, 2006), mais elle biaise la comparaison entre deux stratégies de gestion forestière. En effet, si seuls les flux qui doivent être comptabilisés dans le secteur LULUCF étaient pris en compte, la gestion forestière serait défavorisée par rapport à l'absence de gestion forestière, car l'effet de substitution qui résulte de l'utilisation du bois récolté ne serait pas comptabilisé (Fehrenbach *et al.*, 2022 ; Martes & Köhl, 2022 ; Schulze *et al.*, 2020).

Problèmes liés à l'effet de substitution

Les chercheurs qui s'intéressent au bilan carbone du secteur forestier n'accordent pas tous le même poids à l'effet de substitution et ce pour plusieurs raisons.

L'effet de substitution, matérielle ou énergétique, est évalué à l'aide de facteurs de substitution (FS ou SF, pour *substitution factors*) ou de facteurs de déplacement (DF, pour *displacement factors*) (Fortin *et al.*, 2012 ; Geng *et al.*, 2017 ; Pichancourt *et al.*, 2018). Dans la littérature, plusieurs définitions existent pour ces deux facteurs, mais l'objectif est toujours de quantifier les émissions de CO₂ qui sont évitées en utilisant du bois à la place d'un matériau ou d'une source d'énergie fossile alternative. Dans la méta-analyse de Sathre et O'Connor (2010), qui est souvent prise comme référence (Geng *et al.*, 2017 ; Martes & Köhl, 2022), le facteur de déplacement est exprimé en tC/tC. Il représente donc la quantité de carbone dont l'émission dans l'atmosphère est évitée, par effet de substitution, par tonne de carbone contenu dans le produit bois utilisé à la place du matériau alternatif ou de la source d'énergie fossile alternative.

Si le concept en lui-même est assez simple, déterminer précisément les émissions de CO₂ qui sont évitées par effet de substitution matérielle est particulièrement complexe, d'une part car les produits bois et les matériaux alternatifs considérés diffèrent entre les études (Geng *et al.*, 2017) et, d'autre part, car le mix énergétique est différent d'un pays à l'autre (Pichancourt *et al.*, 2018 ; Schulze *et al.*, 2022). Ainsi, les émissions de CO₂ évitées par effet de substitution seront considérablement plus élevées pour un pays dont les sources d'énergie sont principalement fossiles que pour un pays qui dépend essentiellement de l'énergie nucléaire (Pichancourt *et al.*, 2018).

⁴ Pour une analyse plus détaillée de la question, voir Martes & Köhl, 2022.

⁵ Comme l'effet de substitution est basé sur une comparaison de cycles de vie, les émissions de CO₂ liées à la récolte, au transport et à la transformation du bois sont déjà prises en compte dans l'effet de substitution. Ainsi, pour éviter un double comptage, seul l'effet de substitution est évalué lorsque deux scénarios sont comparés.

Par ailleurs, certaines études calculent leurs facteurs de substitution sur base d'une partie du cycle de vie, tandis que d'autres considèrent également la fin de vie. Considérer l'ensemble du cycle de vie revient, pour les produits bois valorisés en énergie après leur durée de vie, à additionner les effets de la substitution matérielle et de la substitution énergétique. Le facteur de substitution calculé s'en trouve donc considérablement augmenté (Sathre & O'Connor, 2010). Ces différents éléments permettent d'expliquer pourquoi les valeurs pour les facteurs de substitution matérielle varient autant dans la littérature (Geng *et al.*, 2017). En faisant une revue de la littérature, Geng *et al.* (2017) ont mis en évidence que les valeurs pour les DF se situent entre 0,25 et 5,6 tC/tC, ce qui est proche des valeurs moyennes déterminées par Sathre & O'Connor (2010), soit de 0,8 et 4,6 tC/tC. L'incertitude est telle que certains chercheurs choisissent de ne pas tenir compte de la substitution matérielle (voir par exemple Schulze *et al.*, 2020).

La substitution énergétique est plus aisée à quantifier que la substitution matérielle, car excepté pour les différences entre les mix énergétiques, elle n'est pas concernée par les problèmes décrits dans le paragraphe précédent (Geng *et al.*, 2017). Selon Sathre & O'Connor (2010), les DF pour la substitution énergétique sont compris entre < 0.5 et environ 1, en fonction de la source d'énergie fossile substituée et de l'efficacité de la combustion. Dans le cas où le facteur de déplacement pour le bois énergie est < 1 , cela signifie qu'une plus grande quantité de CO₂ est relarguée dans l'atmosphère que si une source d'énergie fossile avait été utilisée, ce qui dégrade le bilan carbone à court terme (Geng *et al.*, 2017). Toutefois, plusieurs études mentionnent que contrairement aux combustibles fossiles, dont l'utilisation comme énergie injecte du carbone de la croûte terrestre dans l'atmosphère, le carbone libéré lors de la combustion du bois faisait déjà partie du cycle biosphère-atmosphère (Geng *et al.*, 2017 ; Pichancourt *et al.*, 2018 ; Schulze *et al.*, 2022). La valorisation énergétique du bois local resterait donc quand même plus intéressante que l'utilisation de sources d'énergie fossiles, peu importe la valeur du DF.

Au-delà des problèmes liés à la difficulté de quantifier correctement l'effet de substitution, certains chercheurs soulignent le fait que celui-ci n'est qu'hypothétique, contrairement aux stocks et aux autres flux. En effet, des émissions de CO₂ ne seront évitées que s'il y a effectivement substitution (Fehrenbach *et al.*, 2022), mais rien ne permet de garantir que ce sera effectivement le cas. En suivant le principe de l'offre et de la demande, si du bois est utilisé en remplacement d'autres matériaux ou sources d'énergie, la baisse de prix conséquente à la baisse de demande mènera à une plus grande consommation de ces autres matériaux ou sources d'énergie, annulant ainsi l'effet de substitution initial (Howard *et al.*, 2021).

Dans la comparaison de scénarios, même en faisant abstraction de l'incertitude sur les valeurs, il semble donc justifié de ne pas accorder le même poids aux émissions de CO₂ évitées par substitution (qui ne sont qu'hypothétiques) et aux émissions liées à la récolte, au transport et à la transformation du bois (qui arriveront de manière certaine). Les chercheurs se trouvent donc face au dilemme suivant : ignorer l'effet de substitution, au risque de grandement sous-estimer le potentiel de réduction de la concentration en GES d'un scénario (Fortin *et al.*, 2012 ; Klein *et al.*, 2013 ; Martes & Köhl, 2022 ; Mishra *et al.*, 2022 ; Schulze *et al.*, 2020), ou en tenir compte, au risque de surestimer ce potentiel. En pratique, de nombreuses études en tiennent compte (voir par exemple Geng *et al.*, 2017 ; Hiltunen *et al.*, 2021 ; Martes & Köhl, 2022), en accord avec le GIEC qui considère, avec un haut degré de certitude, qu'au niveau du produit, l'effet de substitution matérielle a, en moyenne, une influence favorable pour le climat (IPCC, 2022).

1.2.2. Quelle stratégie choisir pour optimiser le bilan carbone du secteur forestier ?

Après avoir défini les stocks et flux à prendre en compte et après avoir abordé les problèmes liés à l'effet de substitution, la question de la stratégie à favoriser pour optimiser le bilan carbone du secteur forestier peut être abordée.

Pour rappel, les deux grandes stratégies définies par le GIEC (voir point 1.2.1) peuvent être opposées et, en considérant les cas extrêmes, réduites à la question suivante : faut-il, pour optimiser le bilan carbone du secteur forestier, pratiquer une gestion forestière qui exporte de manière durable⁶ une partie du stock de carbone de la forêt dans les produits bois ou chercher à augmenter les stocks de carbone en forêt, en arrêtant la récolte de bois (Martes & Köhl, 2022 ; Schulze *et al.*, 2020) ?

La récolte de bois s'accompagne généralement d'une diminution des stocks de carbone en forêt (principalement de la biomasse vivante et de la matière organique morte), d'une augmentation des stocks hors de la forêt (dans les produits bois), mais aussi d'émissions de CO₂ lors de la récolte, du transport et de la transformation du bois et, potentiellement, d'émissions de CO₂ évitées par effet de substitution (Schulze *et al.*, 2020).

Les conséquences de la récolte de bois sur les stocks de carbone en forêt dépendent, entre autres, de la gestion forestière (scénario et itinéraire sylvicoles) ainsi que de la structure et de la composition de la forêt (Fehrenbach *et al.*, 2022). Toutefois, comme une partie de la biomasse récoltée est valorisée en énergie, la situation avec récolte de bois s'avère être globalement moins intéressante, au niveau des stocks de carbone, que la situation sans récolte (Vallet *et al.*, 2009). En ne considérant que les stocks de carbone, Martes & Köhl (2022) ont également mis en évidence que le scénario sans gestion forestière (et donc sans récolte de bois) est de loin le plus intéressant. Par contre, en incluant l'effet de substitution, ce même scénario s'avère être moins intéressant que tous les scénarios avec récolte de bois. Dans le cas où des émissions de CO₂ sont effectivement évitées par effet de substitution, celles-ci se cumulent au cours du temps et sont en quelque sorte irréversibles (Cláudia Dias *et al.*, 2009 ; Geng *et al.*, 2017).

En outre, miser tout sur le stockage du carbone dans l'écosystème forestier est une stratégie risquée compte tenu du contexte climatique changeant (Király *et al.*, 2022 ; Fehrenbach *et al.*, 2022 ; Schulze *et al.*, 2022). Chen *et al.* (2008) ont par exemple mis en évidence que les mesures prises contre les incendies dans les forêts gérées de l'Ontario, au Canada, permettent d'avoir un bilan carbone plus favorable pour les forêts gérées que pour les forêts non gérées. En effet, les mesures de protection permettent de diminuer significativement la superficie brûlée dans les forêts gérées et les émissions de CO₂ qui y sont associées. De manière similaire, Schulze *et al.* (2020) ont montré que, à cause des dégâts biotiques et abiotiques, les volumes sur pied moyens par hectare étaient similaires dans les forêts gérées et dans les forêts non gérées en Allemagne. Selon Schulze *et al.* (2022), les aléas climatiques diminuent la probabilité d'atteindre le stock maximum théorique dans l'écosystème.

Ainsi, il semble que le choix de la stratégie à favoriser dépende fortement de l'importance accordée à la substitution et de l'échelle temporelle (Klein *et al.*, 2013 ; Martes & Köhl, 2022). En ne considérant que les stocks de carbone, augmenter le stock sur pied en diminuant - voire en arrêtant - la récolte de

⁶ La question ne se pose évidemment que pour une gestion forestière durable. Dans tous les articles cités dans ce mémoire et dont l'objectif est de mettre en lumière la stratégie à adopter pour optimiser le bilan carbone du secteur forestier, il est toujours question de gestion forestière durable, au moins selon la définition de von Carlowitz (1730, cité par Schulze *et al.*, 2020), selon laquelle la récolte ne doit pas dépasser l'accroissement. Dans ce mémoire, c'est cette définition de la gestion durable qui sera considérée, car la prise en compte des aspects sociaux et environnementaux sort du cadre de cette étude.

bois est une mesure favorable pour le bilan carbone du secteur forestier, pour autant que les risques de dégâts abiotiques et biotiques restent acceptables. En incluant l'effet de substitution, la stratégie avec récolte de bois est préférable, au moins à moyen et long terme (Chen *et al.*, 2008 ; Geng *et al.*, 2017 ; Martes & Köhl, 2022 ; Schulze *et al.*, 2020 ; Schulze *et al.*, 2022). C'est d'ailleurs ce que préconise le GIEC : *"In the long term, a sustainable forest-management strategy aimed at maintaining or increasing forest carbon stocks, while producing an annual yield of timber, fibre or energy from the forest, will generate the largest sustained mitigation benefit"* (IPCC, 2007).

Ainsi, indépendamment de l'importance accordée à la substitution, l'échelle temporelle s'avère également déterminante pour le choix de la stratégie à favoriser (Klein *et al.*, 2013). A court terme, que l'effet de substitution soit considéré ou non, il vaut mieux favoriser le stockage du carbone dans l'écosystème forestier (Hiltunen *et al.*, 2021 ; Király *et al.*, 2022), au moins dans les forêts jeunes dont le stock de carbone est éloigné du maximum théorique (Martes & Köhl, 2022 ; Schulze *et al.*, 2022).

Toutefois, ces deux grandes stratégies ne doivent pas être considérées comme étant mutuellement exclusives. Selon Martes & Köhl (2022), la meilleure stratégie est celle qui consiste à choisir de maintenir certaines forêts libres de toute gestion forestière (notamment celles avec un haut potentiel d'accueil de la biodiversité) tout en pratiquant, dans d'autres, une gestion forestière visant à récolter le bois dont la société a besoin.

1.2.3. Utilisation des produits bois

Lorsqu'une gestion forestière visant à récolter du bois est pratiquée, la question de l'influence de l'utilisation du bois sur le bilan carbone se pose. Même si cela dépend fortement de la sylviculture, la quantité de carbone stockée dans les produits bois est généralement faible⁷ par rapport à la quantité de carbone stockée dans la biomasse vivante et, a fortiori, dans l'écosystème forestier (Geng *et al.*, 2017 ; Liski *et al.*, 2001). Ceci s'explique notamment par les faibles rendements de la transformation du bois et par la valorisation énergétique d'une part de la récolte (Vallet *et al.*, 2009). En revanche, plusieurs études ont mis en évidence que les produits bois peuvent représenter, au moins à l'échelle régionale, un puits de carbone important (Chen *et al.*, 2008 ; Geng *et al.*, 2017). Autrement dit, les modifications annuelles du stock de carbone dans les produits bois peuvent être considérablement plus importantes que dans l'écosystème forestier (pour autant que la gestion forestière reste la même).

Pour les forêts de l'Ontario, Chen *et al.* (2008) ont estimé que les stocks de carbone dans les produits bois et en forêt devraient augmenter respectivement de 3,6 et 0,7 Mt/an dans les prochaines décennies. En pratique, la différence n'est pas toujours aussi marquée (Geng *et al.*, 2017). Toutefois, lorsque la récolte de bois maintient les stocks de carbone de l'écosystème forestier relativement constants et qu'une part importante du bois en fin de vie est enfouie en décharge, les puits de carbone peuvent être très différents (Chen *et al.*, 2008).

En outre, l'effet de substitution associé à l'utilisation du bois comme matériau ou comme source d'énergie peut être potentiellement important. En faisant abstraction du caractère hypothétique de la substitution, plusieurs études affirment que, sur le long terme, les émissions de CO₂ évitées par substitution peuvent être plus importantes que la quantité de carbone stockée dans les produits bois (Sathre & O'Connor, 2010) ou dans l'écosystème forestier (Lippke *et al.*, 2011).

Quoi qu'il en soit, il apparaît clairement qu'au niveau du bilan carbone, l'utilisation optimale des produits bois soit celle qui permette à la fois de maximiser le stock de carbone et de maximiser l'effet

⁷ Il est difficile de donner un ordre de grandeur, tant les facteurs qui influencent la quantité de carbone stockée dans les produits bois sont nombreux. Quelques références sont toutefois données à la section 4.2.

de substitution (Geng *et al.*, 2017). Ce double enjeu peut être atteint en favorisant les produits bois à longue durée de vie et un système en cascade, avec réutilisation, réemploi et une valorisation finale en énergie (Fehrenbach *et al.*, 2022 ; Fortin *et al.*, 2012 ; Király *et al.*, 2022 ; Pichancourt *et al.*, 2018 ; Schulze *et al.*, 2020 ; Verkerk *et al.*, 2022).

En pratique, le bois n'a pas toujours les qualités requises pour être transformé en produits à longue durée de vie (Mishra *et al.*, 2022). Cependant, même dans ce cas, il semble plus intéressant de lui donner d'abord une fonction matérielle avant de le valoriser en énergie. En effet, il vaut mieux retarder au maximum les émissions de CO₂ par une utilisation matérielle la plus longue possible et une valorisation énergétique en fin de vie seulement (Geng *et al.*, 2017)⁸. En l'absence de dispositif de collecte du méthane⁹, la valorisation énergétique du bois en fin de vie est plus intéressante que la mise en décharge, même si cela permet d'augmenter la quantité de carbone stockée dans les produits bois (Chen *et al.*, 2008 ; Fortin *et al.*, 2012 ; Verkerk *et al.*, 2022).

1.2.4. Gestion forestière

Pour analyser l'impact sur le bilan carbone du secteur forestier dans son ensemble, il convient également de s'intéresser à la manière dont la forêt est gérée (Baul *et al.*, 2020). La gestion forestière a un impact direct sur la quantité et la qualité du bois qui sort de la forêt et, en ce sens, elle conditionne l'utilisation des produits bois (Fortin *et al.*, 2012 ; Liski *et al.*, 2001). Même en ne considérant que les aspects liés au stockage du carbone, l'influence du choix de la gestion forestière est donc à la fois important (voir point 1.2.1.) et complexe à évaluer (Vallet *et al.*, 2009). Hiltunen *et al.* (2021) citent trois éléments de la gestion forestière qui influencent, à plus ou moins long terme, le bilan carbone du secteur forestier : le choix des essences, l'intensité et la rotation des éclaircies et, pour les peuplements équiennes, la durée de la révolution¹⁰.

Le choix des essences

Le choix des essences peut influencer significativement le bilan carbone du secteur forestier (Klein *et al.*, 2013 ; Vallet *et al.*, 2009). En pratique, la discussion est plutôt axée sur la comparaison entre des essences à croissance rapide, très productives et des essences à croissance plus lente et plus soutenue (Király *et al.*, 2022 ; Vallet *et al.*, 2009).

Vallet *et al.* (2009) ont étudié l'impact sur le bilan carbone du remplacement, en France, des forêts de chêne sessile (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl.) par des plantations de pin laricio (*Pinus nigra* subsp. *laricio* (Poiret) Maire). Leurs résultats indiquent qu'à la fin de la première révolution, le stock total de carbone est supérieur de 102 tC/ha pour les plantations de pin laricio (essence plus productive), mais la moyenne au cours du temps du stock total de carbone est de 42 à 47 tC/ha (en fonction du scénario sylvicole) plus faible dans les plantations de pin laricio que dans les forêts de chêne sessile. Toutefois, cette analyse n'est basée que sur les stocks et les auteurs mentionnent que la prise en compte de l'effet de substitution pourrait modifier les résultats, d'autant plus que les débouchés ne sont pas les mêmes pour le bois des deux essences (Vallet *et al.*, 2009).

En prenant en compte l'effet de substitution, Klein *et al.* (2013) ont montré que, pour la Bavière (Allemagne), l'épicéa commun (*Picea abies* (L.) H. Karst) s'avère plus intéressant, au niveau du bilan carbone et sur une période de 180 ans, que d'autres essences moins productives comme le hêtre (*Fagus sylvatica* L.) et le chêne sessile. Toutefois, ils précisent qu'en prenant en compte le changement

⁸ Pour une analyse détaillée du débat autour de l'utilisation du bois énergie, voir Geng *et al.* (2017).

⁹ Sur une durée de 100 ans, le potentiel de réchauffement global du CH₄ est 28 fois plus élevé que celui du CO₂.

¹⁰ Cette liste n'est pas exhaustive, mais elle synthétise bien les éléments de la gestion forestière qui sont fréquemment étudiés.

climatique et les perturbations, les conclusions pourraient changer en faveur du hêtre. Király *et al.* (2022) soulignent également la contribution significative que les essences à croissance rapide peuvent apporter au puits de carbone forestier (du moins à court terme), mais ils attirent aussi l'attention sur le fait que ces plantations sont plus à risques dans le contexte climatique changeant que les forêts mixtes.

Ainsi, le choix de l'espèce ou du groupe d'espèces pour optimiser le bilan carbone du secteur forestier semble à nouveau fortement dépendre de l'échelle temporelle et de l'importance accordée à la substitution. En outre, il importe également de tenir compte de la sensibilité des peuplements dans le contexte climatique changeant, d'où la nécessité d'une évaluation de la question à l'échelle régionale.

Le choix du scénario sylvicole¹¹

La longueur de révolution affecte tous les stocks de carbone. En effet, comme elle détermine la quantité et la qualité du bois récolté, elle influence à la fois la quantité de carbone stockée dans l'écosystème forestier et celle qui l'est dans les produits bois. Raccourcir la longueur de révolution peut permettre d'augmenter le volume moyen annuel de récolte, ce qui est négatif pour le stock de carbone en forêt, mais positif pour le stock de carbone dans les produits bois. Toutefois, si cette augmentation se fait au détriment de la qualité, la proportion du bois d'industrie et d'énergie peut également augmenter et possiblement contrebalancer l'effet positif de l'augmentation du volume moyen annuel de récolte sur le stock de carbone (Liski *et al.*, 2001).

Pour une même longueur de révolution, les effets d'un changement dans le régime d'éclaircies peuvent s'apparenter à ceux décrits à la section 1.2.2. En effet, les éclaircies peuvent être plus ou moins fréquentes et plus ou moins intenses (Hiltunen *et al.*, 2021). Ainsi, en prenant les cas extrêmes, cela revient à comparer un scénario sylvicole sans éclaircies - dont les effets s'apparentent à ceux de l'absence de gestion forestière - avec un scénario sylvicole qui contient des éclaircies fortes et fréquentes.

Pour l'épicéa commun dans les forêts boréales, augmenter de 20% le stock sur pied par rapport aux recommandations nationales locales permet d'améliorer le bilan carbone du secteur forestier (Baul *et al.*, 2020 ; Hiltunen *et al.*, 2021). Selon Pajot (2011), pour le pin maritime (*Pinus pinaster* Aiton) dans les Landes de Gascogne, augmenter la longueur de la révolution au-delà de l'optimum économique permettrait d'augmenter le stockage du carbone dans la biomasse vivante. Fortin *et al.* (2012) ont également mis en évidence qu'augmenter la longueur de révolution et maintenir un plus grand stock sur pied est une mesure favorable pour le bilan carbone des futaies régulières de chêne sessile dans le Nord de la France. Cependant, les peuplements plus denses sont plus à risque que les peuplements plus éclaircis et ceci est d'autant plus vrai que la révolution est longue (Fortin *et al.*, 2012). Ainsi, les auteurs ne recommandent pas d'étendre la longueur de révolution sans évaluation préalable du risque d'évènements climatiques extrêmes.

¹¹ La durée de révolution et le régime d'éclaircies sont étroitement liés. Dans cette étude, ces deux éléments sont analysés ensemble et regroupés sous le vocable « scénario sylvicole ».

1.3. Bilan et questions de recherche

L'évaluation de l'influence du secteur forestier sur la concentration en GES de l'atmosphère revêt une importance particulière pour les pays qui se sont engagés à réduire leurs émissions de GES. Pour les forêts gérées en vue de récolter du bois, des mesures peuvent être prises tant au niveau de la gestion forestière qu'au niveau de l'utilisation des produits bois pour tenter d'optimiser le bilan carbone du secteur forestier.

Pour l'utilisation des produits bois, favoriser les produits à longue durée de vie et un système en cascade, avec une valorisation finale en énergie, semble être la stratégie la plus intéressante.

Pour la gestion forestière, le choix de la stratégie à favoriser est étroitement lié au contexte environnemental et climatique local. Pour cette raison, l'étude de l'influence de la gestion forestière sur le bilan carbone du secteur forestier est préférentiellement réalisée à l'échelle régionale (Klein *et al.*, 2013). Or, à notre connaissance, aucune étude n'a à ce jour été réalisée pour la Wallonie. Pourtant, le secteur forestier wallon connaît actuellement des changements importants, notamment une diminution progressive des peuplements de résineux au profit des peuplements de feuillus (Latte *et al.*, 2022). Dans la littérature, trois éléments de la gestion forestière ayant une influence sur le bilan carbone ressortent : le choix des espèces, l'intensité et la rotation des éclaircies et la longueur de la révolution.

L'objectif de cette étude est d'étudier, à l'échelle de la Wallonie, l'influence de ces trois éléments sur le bilan carbone du secteur forestier. Plus précisément, l'objectif est de caractériser, dans un premier temps, la filière bois wallonne, afin de pouvoir, dans un second temps, répondre aux questions de recherche suivantes :

- a) Quelle est l'influence, sur le bilan carbone, du remplacement des pessières régulières par des futaies jardinées feuillues ?
- b) Quelle est l'influence d'un changement de longueur de révolution et de la suppression des éclaircies sur le bilan carbone des pessières régulières ?

2. Matériel et méthodes

2.1. Logiciel de comptabilité carbone : CAT (*Carbon Accounting Tool*)

2.1.1. Justification du choix

Parmi les 41 outils de comptabilité carbone analysés par Brunet-Navarro *et al.* (2016), le logiciel CAT (Pichancourt *et al.*, 2018) s'avère être particulièrement intéressant, notamment lorsqu'il s'agit de représenter une filière bois complexe. Par ailleurs, le logiciel CAT permet d'éviter les importants biais liés à la séparation des secteurs présentés dans l'introduction et d'estimer l'importance des incertitudes avec la méthode de Monte Carlo. Cette méthode consiste à prendre des valeurs aléatoires au sein des distributions de probabilité des paramètres d'entrée. Ainsi, lorsqu'un grand nombre de tirages est réalisé, l'incertitude sur les paramètres d'entrée est reportée sur les résultats (Pichancourt *et al.*, 2018).

Sur base de ces différents éléments, mais aussi pour rester dans la continuité du travail de Wohlfrom (2022), c'est le logiciel CAT, version 1.2.10 qui a été utilisé dans cette étude.

2.1.2. Description du logiciel

2.1.2.1. Approche et méthodologie

Le logiciel CAT a été développé en accord avec les lignes directrices du GIEC pour les inventaires nationaux de gaz à effet de serre dans les secteurs LULUCF et *waste* (IPCC, 2019 ; Pichancourt *et al.*, 2018).

Parmi les quatre approches définies par le GIEC pour l'évaluation du stock de carbone dans les produits bois, seule l'approche production peut être suivie en utilisant ce logiciel (Pichancourt *et al.*, 2018). L'approche détermine les frontières du système qui sont considérées pour l'évaluation des quantités de CO₂ stockées dans les produits bois, qui y entrent ou qui en sortent. En suivant l'approche production, le pays ou la région qui cherche à faire cette évaluation ne tient compte que des bois produits dans ce pays ou cette région, peu importe l'endroit où ils seront utilisés (IPCC, 2019).

En plus du choix de l'approche (et donc des frontières du système), il convient également de choisir une méthode de calcul parmi les trois méthodes proposées par le GIEC. La méthode fait référence aux calculs nécessaires pour implémenter une approche particulière. Le choix de la méthode repose sur un arbre de décision qui permet de déterminer celle qui est la plus adaptée compte tenu des éléments à disposition.

De manière simplifiée¹², la méthode la plus basique, appelée Tier 1, est à appliquer par défaut. Dans le cas où des valeurs spécifiques au pays ou à la région existent, il est conseillé d'utiliser la seconde méthode, appelée Tier 2, qui se base sur les mêmes équations que la méthode Tier 1 tout en permettant d'intégrer les valeurs locales. Lorsqu'il existe une méthode développée spécifiquement pour le pays ou la région d'intérêt et que celle-ci permet une évaluation au moins aussi précise que la méthode Tier 1, celle-ci peut être utilisée (méthode Tier 3) (IPCC, 2019). La flexibilité du logiciel CAT permet d'utiliser les trois méthodes.

En résumé, l'approche définit ce qui doit être estimé et reporté et la méthode indique comment y parvenir (comment calculer les flux de CO₂ qui doivent être reportés). L'approche suivie dans le cadre

¹² Pour une description détaillée des différentes méthodes, voir IPCC (2019), volume 4 chapitre 12.

de cette étude est l'approche production, car en plus d'être la plus adaptée pour répondre aux questions de recherche (IPCC, 2019), c'est pour cette approche que le logiciel CAT a été développé. En accord avec les données disponibles pour la Wallonie, c'est la méthode Tier 2 qui est utilisée.

2.1.2.2. Fonctionnement du logiciel¹³

Le fonctionnement du logiciel CAT est schématisé à la figure 1. La biomasse vivante, la matière organique morte et les produits bois représentent les trois réservoirs de carbone dont le logiciel tient compte (la quantité de carbone stockée dans le sol est considérée constante). Comme CAT ne permet pas de faire des simulations de croissance, il est nécessaire de le coupler avec un modèle de croissance compatible ou d'importer une table de production. A chaque instant t, le logiciel peut analyser tous les arbres et les traiter en fonction de leur statut :

- Les arbres vivants sont convertis en carbone et forment la biomasse vivante ;
- Les arbres récoltés sont séparés en différentes catégories grâce à un modèle de billonnage (*bucking module*) et transformés en produits bois grâce à un gestionnaire de flux (*flux manager*) ;
- Les arbres morts, les chablis et les rémanents des arbres récoltés (branches fines, souches et racines) sont soit convertis en carbone pour alimenter la matière organique morte¹⁴, soit traités comme les arbres récoltés.

Ainsi, lorsqu'une récolte de bois est simulée par le simulateur de croissance, le modèle de billonnage permet au logiciel CAT de séparer ce volume total en lots de différentes qualités. Sans modèle de billonnage, le logiciel CAT serait incapable de savoir de quelle qualité sont les bois récoltés et, par conséquent, de les diriger correctement au sein des lignes de production dans le gestionnaire de flux. Le gestionnaire de flux permet de schématiser et caractériser la filière bois d'intérêt au sein du logiciel.

En plus du modèle de billonnage et du gestionnaire de flux, il convient de définir dans CAT les paramètres de la biomasse qui serviront à la conversion des volumes de bois en quantités de carbone. Par ailleurs, il convient de définir aussi la durée de vie moyenne de la litière et du bois mort, pour que le logiciel puisse estimer l'évolution de la quantité de carbone stockée dans la matière organique morte. Plus d'informations sur la conversion des volumes de bois en carbone et sur l'évolution du stock de carbone dans les différents réservoirs se trouvent en annexes (Annexe 1).

¹³ Pour une description complète et détaillée du logiciel CAT, voir Pichancourt *et al.* (2018). Les éléments repris dans cette partie proviennent de cette étude et du site internet <https://sourceforge.net/p/lerfobforesttools/wiki/CAT/>.

¹⁴ A chaque début de simulation, le stock de carbone dans la matière organique morte et dans les produits bois est nul ; il n'est pas possible de fixer une valeur initiale pour le stock dans ces deux réservoirs.

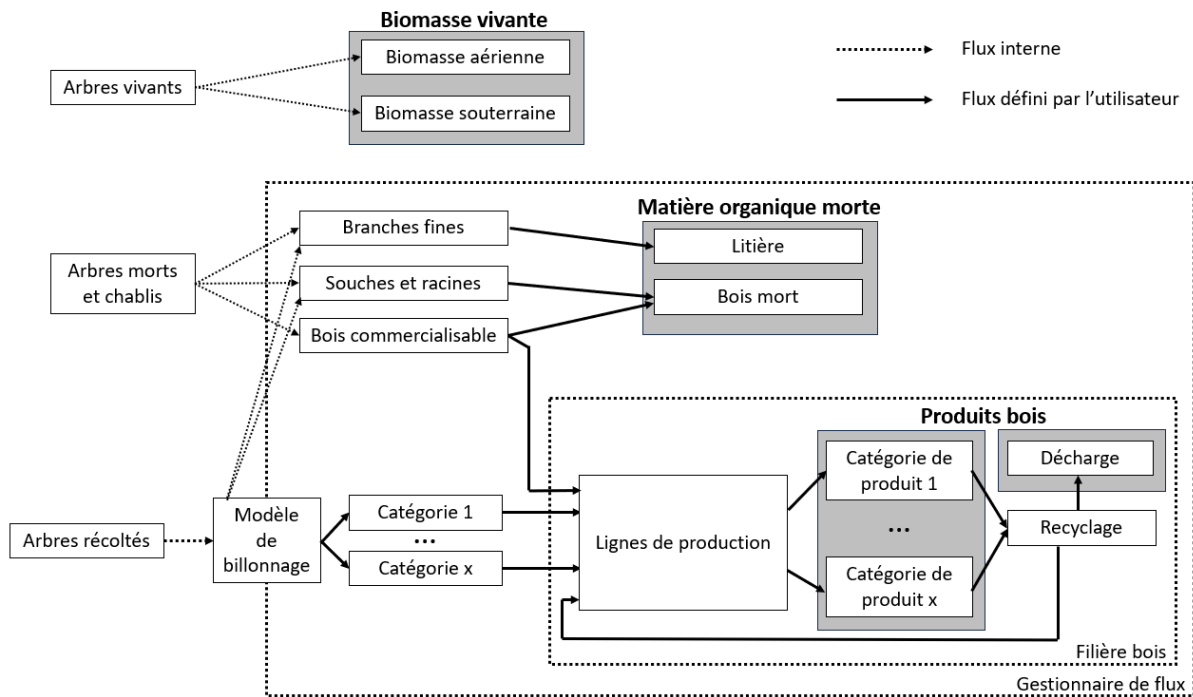


Figure 1 : Représentation schématique du fonctionnement du logiciel CAT pour les arbres issus à un instant t de la simulation de croissance (adaptée à partir de Pichancourt et al. (2018)). Les boîtes grises représentent les réservoirs de carbone. Les flèches en pointillés représentent les flux internes, définis par défaut pour éviter les fuites de carbone. Ainsi, les branches fines représentent la différence entre la quantité de carbone dans la biomasse aérienne des arbres et la quantité de carbone dans la partie de taille commercialisable. Les flèches en traits pleins peuvent être changées par l'utilisateur. Pour une question de clarté, la valorisation énergétique des produits, des branches fines ou des souches et racines n'est pas représentée sur le schéma.

Après une simulation du bilan carbone, les résultats peuvent être soit visualisés dans le logiciel, soit exportés en format csv (séparateur : point-virgule). Les résultats fournis par le logiciel sont :

- L'évolution des quantités de carbone stockées dans les différents réservoirs et l'évolution cumulative des flux (émissions de CH_4 , de CO_2 et émissions de CO_2 évitées par substitution) ;
- Les volumes de bois récoltés par catégorie ;
- La distribution du bois récolté au sein des différentes catégories de produits (sans ou avec recyclage).
- La moyenne des stocks et des flux en séquence infinie (le logiciel calcule donc les stocks et flux moyens en considérant que la séquence simulée est répétée à l'infini).

Comme mentionné précédemment, le logiciel CAT permet de propager l'incertitude liée à cinq catégories de paramètres d'entrée¹⁵ avec la méthode de Monte Carlo (voir section 2.1.1). Les différents résultats présentés ci-dessus peuvent donc se présenter soit sous la forme de valeurs uniques (si l'incertitude n'est pas prise en compte – une réalisation), soit sous la forme de x valeurs pour un seul et même élément (si l'incertitude est prise en compte – x réalisations).

Le logiciel CAT permet également de comparer deux scénarios au niveau des stocks et flux moyens. Lorsque le nombre de réalisations simulées est identique pour les deux scénarios, les réalisations sont appariées. Ainsi, les valeurs pour les réalisations portant le même numéro sont calculées sur base des mêmes tirages pour les paramètres d'entrée. La comparaison des scénarios est alors basée sur les différences entre chaque paire de réalisations, de manière similaire à un test de Student apparié.

¹⁵ Les facteurs d'expansion de la biomasse, les masses volumiques anhydres, le contenu en carbone de la biomasse, les durées de vie et les facteurs de substitution.

2.2. Collecte des données

2.2.1. Paramètres de la biomasse et durées de vie moyennes de la litière et du bois mort

Pour les paramètres de la biomasse, ce sont les valeurs par défaut, déjà intégrées dans le logiciel CAT, qui ont été utilisées (tableau 1). Ce sont donc ces valeurs qui sont utilisées dans les équations pour la conversion des volumes en stocks de carbone (Annexe 1).

Tableau 1 : Valeurs utilisées pour les paramètres de la biomasse (valeurs par défaut de la méthode Tier 1).

	Résineux	Feuillus
Facteur d'expansion des branches [-]	1.3	1.4
Facteur d'expansion des racines [-]	1.32	1.35
Masse volumique anhydre [kg/m ³]	Valeur moyenne pour chaque espèce (Tier 1)	
Teneur en carbone [-]	0.5	0.5

Dans cette étude, les valeurs utilisées pour les durées de vie moyennes dans la litière et le bois mort sont de 32 ans et de 10 ans respectivement. Ces valeurs sont les mêmes que celles utilisées par Fortin *et al.* (2012) et Pichancourt *et al.* (2018) pour le Nord de la France.

2.2.2. Modèle de billonnage

Parmi les différents modèles de billonnage proposés par le logiciel CAT, deux modèles ont été utilisés : le « *CATDiameterBasedTreeLogger* » (DBTL) et le « *BasicTreeLogger* » (BTL).

Parmi les modèles multi-espèces, c'est le DBTL qui permet d'effectuer la séparation la plus fine, en trois catégories différentes : bois d'industrie et d'énergie, petit bois d'œuvre et bois d'œuvre. Ce modèle nécessite de préciser, pour chaque espèce, le diamètre à partir duquel chaque catégorie est atteinte et, pour chaque catégorie, le volume commercial (la part de l'arbre qui est récoltée) et le pourcentage de déclassés¹⁶. Dans cette étude, les données utilisées pour le modèle de billonnage DBTL proviennent d'une discussion avec un expert sur base de valeurs préalablement trouvées dans la littérature.

Le modèle de billonnage BTL est plus basique que le DBTL et nécessite simplement de définir les pourcentages des bois récoltés qui se trouvent dans les catégories « bois de sciage » et « bois de trituration ». Ces pourcentages peuvent directement être déduits à partir des données de la filière bois (voir section 2.2.4). Contrairement au modèle DBTL, qui requiert une liste des arbres exploités, le modèle BTL est utilisable même lorsque le logiciel CAT est utilisé sur base d'une table de production.

2.2.3. Propagation de l'incertitude

Le tableau 2 reprend, pour les cinq catégories de paramètres d'entrée, les marges d'erreurs proposées par le GIEC¹⁷. Ces valeurs sont celles qui sont intégrées par défaut dans le logiciel CAT (Pichancourt *et al.*, 2018) et celles qui ont été retenues pour cette étude. Pour les cinq catégories de paramètres, la distribution de probabilité choisie est la distribution uniforme¹⁸ (M. Fortin, communication personnelle, 2023).

¹⁶ Les arbres déclassés sont redirigés vers la catégorie « bois d'industrie et d'énergie ».

¹⁷ Les études qui ont permis de déterminer ces valeurs sont citées dans Pichancourt *et al.* (2018).

¹⁸ Autrement dit, les valeurs comprises dans l'intervalle sont équiprobables.

Tableau 2 : Marges d'erreur suggérées par le GIEC et utilisées dans cette étude pour les cinq catégories de paramètres du logiciel CAT dont l'incertitude peut être prise en compte.

Paramètre d'entrée	Marge d'erreur
Facteurs d'expansion de la biomasse (branches et racines)	15 %
Masses volumiques anhydres	20 %
Teneur en carbone	5 %
Durées de vie	50 %
Facteurs de substitution	50 %

2.2.4. Caractérisation de la filière bois wallonne

Pour caractériser la filière bois wallonne en vue d'une utilisation avec le logiciel CAT, il convient de déterminer :

- Les flux de bois relatifs qui ont lieu au sein de la filière, depuis la récolte jusqu'au traitement des produits bois en fin de vie ;
- Les émissions de CO₂ liées à la production d'une unité fonctionnelle (UF) de chaque catégorie de produit. Ceci comprend donc les émissions liées à la récolte, au transport et à la transformation du bois ;
- Les émissions de CO₂ évitées grâce à la production et à l'utilisation d'une UF de chaque catégorie de produit (facteurs de substitution) ;
- Les durées de vie moyennes estimées pour chaque catégorie de produit.

Le niveau de précision à atteindre est fonction des contraintes de l'étude (Fortin *et al.*, 2012 ; Király *et al.*, 2022 ; Pichancourt *et al.*, 2018 ; Vallet *et al.*, 2009). Pour rester dans la continuité du travail de Wohlfrom (2022) et en accord avec Chen *et al.* (2008) et Cláudia Dias *et al.* (2022), il a été considéré que le devenir des bois wallons exportés est le même que celui des bois transformés en Wallonie¹⁹. Ainsi, la collecte de données ne concerne que la Wallonie, avec une exception pour les panneaux de particules, fabriqués en Flandre en partie par recyclage du bois d'œuvre wallon, car ces données sont aisément accessibles.

Par ailleurs, en accord avec Thyssen *et al.* (2014), la séparation du bois des différentes essences au sein de la filière se limite aux feuillus et aux résineux. Enfin, comme pour Jasinevičius *et al.* (2018), les produits bois présentant des caractéristiques communes ont été regroupés dans des grandes catégories (tableau 3).

¹⁹ Il semble en effet utopique, compte tenu des contraintes temporelles de l'étude, de vouloir déterminer le devenir de tous les bois produits sur un territoire de la taille de la Wallonie. Par ailleurs, le respect strict des frontières de l'approche production est surtout justifié dans les rapports nationaux annuels sur les émissions de GES, car cela permet d'éviter un double comptage ou une omission lorsque les rapports des différents pays sont rassemblés pour les estimations à plus grande échelle (IPCC, 2019).

Tableau 3 : Les catégories de produits issus de la transformation du bois utilisées dans cette étude. Lorsque le nom de la catégorie peut porter à confusion, une définition de la catégorie telle qu'elle est considérée dans cette étude est précisée dans ce tableau.

Catégorie de produits	Définition de la catégorie
Construction	L'ensemble des produits issus du bois d'œuvre dans la construction : bois d'ossature, madriers, bois de charpente traditionnelle, bois lamellé-collé, bois lamellé-croisé, ...
Emballage, coffrage et transport	L'ensemble des produits issus du bois d'œuvre utilisés pour l'emballage, le coffrage et le transport : palettes, caisses, ...
Menuiserie	L'ensemble des produits de menuiserie réalisés à partir de bois massif.
Piquets, poteaux, tuteurs	L'ensemble des piquets, poteaux et tuteurs issus des entreprises de travail du bois rond.
Traverses de chemin de fer	/
MDF	L'ensemble des panneaux de fibres à densité moyenne (<i>Medium-Density Fiberboard</i>).
Papier	Papier couché à base de pâte chimique.
Pellets	Granulés de particules de bois densifiées
Bois énergie	L'ensemble du bois récolté pour une valorisation directe en énergie
Panneaux de particules	/

La collecte des données proprement dite a été effectuée à partir du travail de Wohlfrom (2022). Chaque donnée de ce travail a fait l'objet d'une vérification avant d'être éventuellement retenue pour cette étude. Que ce soit pour la vérification ou pour l'obtention de nouvelles données, la première étape consistait à effectuer une recherche dans la littérature. Dans le cas où aucune donnée chiffrée ne pouvait y être trouvée, un ou plusieurs experts de la filière bois wallonne ont été contactés. L'ensemble des données retenues proviennent de 30 sources différentes (23 sources écrites et sept experts de la filière forêt-bois wallonne). Six hypothèses ont également été prises, lorsqu'il n'était pas possible d'entrer en contact avec les experts du domaine ou qu'aucun des experts contactés n'était en mesure de fournir une estimation.

Une fois toutes les données récoltées, quatre fichiers destinés à être ouverts sur CAT, regroupant toutes ces informations, ont été créés. Ces quatre fichiers ne diffèrent que par le modèle de billonnage et les flux liés aux branches fines (tableau 4).

Tableau 4 : Différences entre les quatre fichiers créés pour les besoins de l'étude. Tous les fichiers sont construits avec les mêmes données, sauf celles concernant les flux liés aux branches fines et le modèle de billonnage. DBTL signifie « CATDiameterBasedTreeLogger » BTL signifie « BasicTreeLogger ».

Nom du fichier	Modèle de billonnage	Branches fines (flux - %)	
DBTL_résineux.prl	DBTL	Litière	100
		Bois énergie	0
DBTL_feuillus.prl	DBTL	Litière	38
		Bois énergie	62
BTL_résineux.prl	BTL	Litière	100
		Bois énergie	0
BTL_feuillus.prl	BTL	Litière	38
		Bois énergie	62

2.3. Description des cas étudiés

2.3.1. Caractérisation de la filière bois wallonne

Pour évaluer le stock de carbone dans les produits bois et l'effet de substitution liés aux valeurs retenues pour caractériser la filière bois wallonne (section 2.2.4.), une coupe unique de 100 m³ a été simulée et importée dans le logiciel CAT²⁰, une première fois en considérant qu'il s'agit de résineux et une deuxième fois en considérant qu'il s'agit de feuillus. Pour obtenir les deux fichiers de sortie avec l'évolution au cours du temps des quantités de carbone stockées dans les produits bois et de l'effet de substitution, le logiciel CAT a été utilisé conformément à la figure 2.

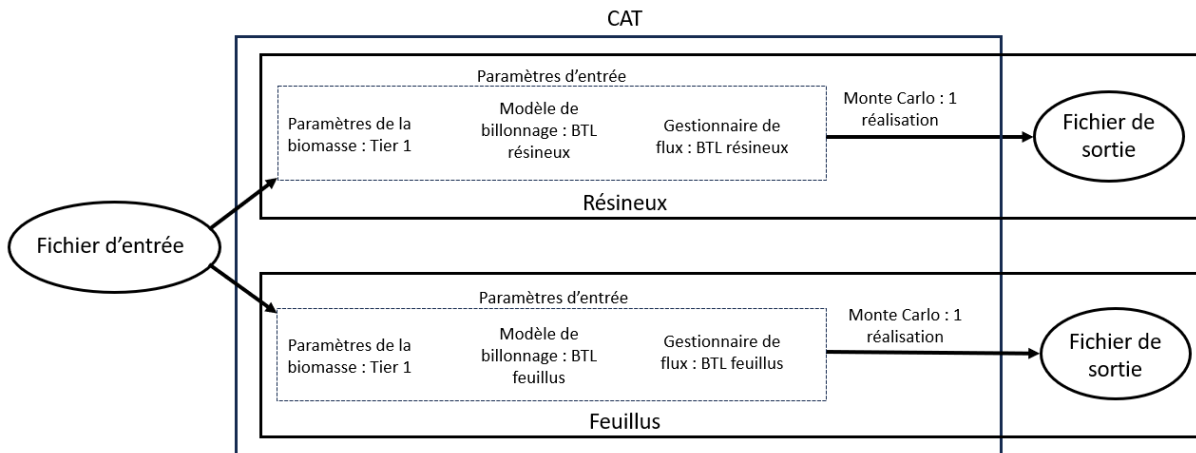


Figure 2 : Schéma illustrant la manière dont le logiciel CAT a été utilisé afin d'obtenir, pour les résineux et pour les feuillus, l'évolution temporelle de l'effet de substitution et du stock de carbone dans les produits bois. Comme l'objectif est simplement d'évaluer le stock de carbone dans les produits bois et l'effet de substitution liés aux valeurs retenues pour caractériser la filière bois wallonne, l'incertitude sur les valeurs n'a pas été prise en compte (une seule réalisation). Le fichier d'inventaire et les fichiers de sortie sont au format csv.

2.3.2. Comparaison du bilan carbone d'une pessière et d'une hêtraie jardinée

Pour simuler les peuplements, les modèles Gymnos et Walsi, implémentés comme des modules JAVA de la plateforme CAPSIS4 (*Computer-aided projection of strategies in silviculture*) (Dufour-Kowalski *et al.*, 2012), ont été utilisés.

Présentation des modèles

Le modèle Gymnos est un modèle de dynamique forestière développé pour la Wallonie, indépendant des distances, qui permet de simuler l'évolution de plantations monospécifiques pour plusieurs essences résineuses : l'épicéa commun, le douglas (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco.) et le mélèze (*Larix decidua* Mill. et *L. kaempferii* (Lamb.) Carrière). C'est un modèle déterministe qui comprend des équations et des algorithmes pour simuler l'initialisation d'un peuplement, l'évolution de sa hauteur dominante, la croissance des arbres, la mortalité et les éclaircies (Ligot *et al.*, 2023). Le modèle, ainsi que les équations et les algorithmes qu'il contient, ont été décrits de manière détaillée dans Ligot *et al.* (2023).

Le modèle Walsi est également un modèle de dynamique forestière développé pour la Wallonie. C'est un modèle semi-empirique, indépendant des distances et arbre-centré, qui permet de simuler l'évolution de peuplements réguliers ou irréguliers, purs ou mixtes, pour 22 espèces et catégories

²⁰ L'objectif étant de caractériser la filière bois indépendamment de la gestion forestière, l'importation des données a été réalisée à partir d'un fichier avec une coupe unique et non à partir d'un modèle de croissance.

d'espèces différentes (voir Annexe 2). Walsi contient des modèles de croissance, de régénération, de mortalité et de gestion du bois mort ainsi que des déclencheurs de coupe et de plantation (V. Van Keymeulen, communication personnelle, 2023)²¹.

Au moment de la réalisation de cette étude, aucun des deux modèles ne permet de prendre en compte le contexte climatique changeant et les simulations se font donc en considérant un climat constant.

Présentation des peuplements

La pessière régulière a été simulée avec Gymnos en accord avec les normes sylvicoles de Perin *et al.* (2016). Elle correspond exactement à la table de production pour l'épicéa, de classe de productivité 2 (hauteur dominante de 27m à 50 ans) et de densité de plantation de 2 000 tiges par hectare (voir Annexe 3), excepté pour la longueur de révolution qui a été fixée à 82 ans et non à 88 ans. Le taux de survie jusqu'à la première éclaircie, effectuée 22 ans après la plantation, est de 90 %. La rotation entre les éclaircies suivantes est de 6 ans. Cette table de production particulière a été choisie de manière à refléter au mieux la situation moyenne des pessières régulières en Wallonie (G. Ligot, communication personnelle, 2023).

La futaie feuillue jardinée a été simulée avec Walsi sur base d'un peuplement virtuel créé à partir d'un inventaire par échantillonnage permanent réalisé en 2022 dans la forêt de Sainte Ode, dans la province du Luxembourg. La futaie est composée à 90% de hêtres ; il s'agit donc d'une hêtraie, dont la surface terrière est maintenue entre 20 et 25 m²/ha par des éclaircies espacées de 12 ans²². L'évolution, sur la rotation simulée, du nombre d'arbres par hectare (NHA), du volume par hectare (VHA) et de la surface terrière par hectare (GHA) se trouve en annexes (Annexe 4).

Une fois simulés, les deux peuplements ont été importés dans le logiciel CAT, paramétré conformément à la figure 3. Pour chaque peuplement, les stocks et flux moyens en séquence infinie, ainsi que les volumes de bois récoltés par catégorie et la distribution du bois récolté au sein des différentes catégories de produits, ont été calculés. En outre, les stocks et flux moyens des deux peuplements ont été comparés avec la fonctionnalité de comparaison des scénarios en séquence infinie du logiciel CAT.

²¹ Pour plus d'informations sur le modèle Walsi, un guide d'utilisation est disponible à l'adresse suivante : <https://hdl.handle.net/2268/305756>

²² Avant la réalisation de ce mémoire, le logiciel CAT ne permettait pas de calculer les stocks et flux moyens en séquence infinie d'une futaie jardinée. Pour les besoins de l'étude, Mathieu Fortin, le développeur du logiciel, y a remédié. Toutefois, pour que les valeurs calculées soient correctes, il est nécessaire d'importer uniquement le cycle qui se répète, soit une rotation dans le cas présent. Ainsi, seule une rotation a été simulée.

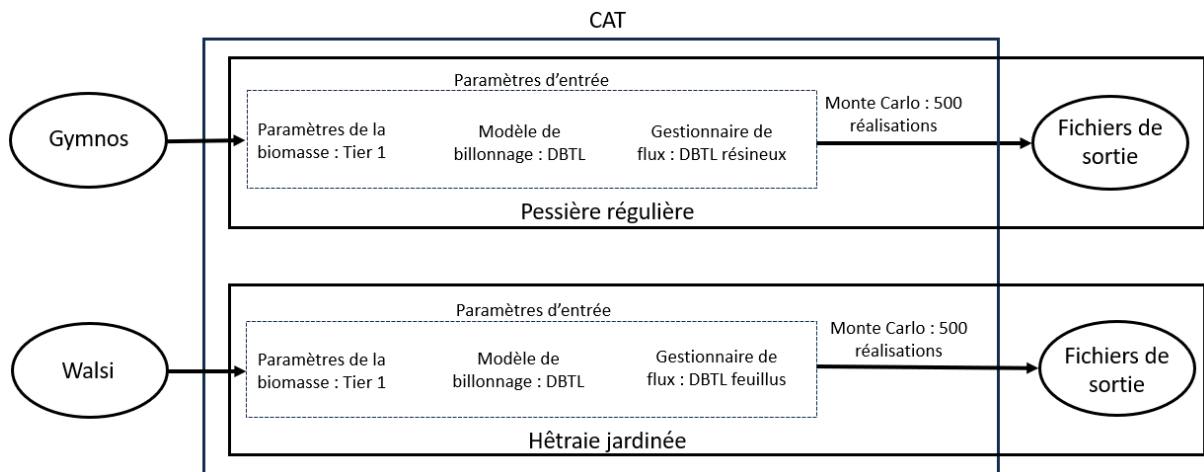


Figure 3 : Schéma illustrant la manière dont le logiciel CAT a été utilisé afin de pouvoir comparer le bilan carbone d'une pessière régulière avec celui d'une hêtraie jardinée. Les fichiers de sortie sont au format csv.

2.3.3. Influence du scénario sylvicole sur le bilan carbone des pessières régulières

Dix pessières régulières, contrastées au niveau du scénario sylvicole, ont ensuite été simulées avec le modèle Gymnos. Les dix scénarios sylvicoles correspondent à la combinaison de deux régimes d'éclaircies ((1) E : application d'éclaircies selon les normes de Perin *et al.* (2016) et (2) SE : aucune éclaircie jusqu'à la mise à blanc) et de cinq longueurs de révolution (58, 70, 82, 88 et 100 ans).

Tous les peuplements ont été obtenus à partir de la même simulation, faite en accord avec la table de production de l'annexe 3, qui correspond à la situation E88. Plus d'informations sur la démarche suivie et sur les peuplements simulés se trouvent en annexes (Annexe 5).

Les dix peuplements ont ensuite été importés dans le logiciel CAT (paramétré conformément à la figure 4) et comparés sur base des mêmes éléments que ceux décrits à la section 2.3.2. Pour les comparaisons, le scénario E82 a été choisi comme scénario de référence, pour sa position centrale et en accord avec la section précédente. Les neuf autres scénarios ont donc été comparés par rapport à cette référence.

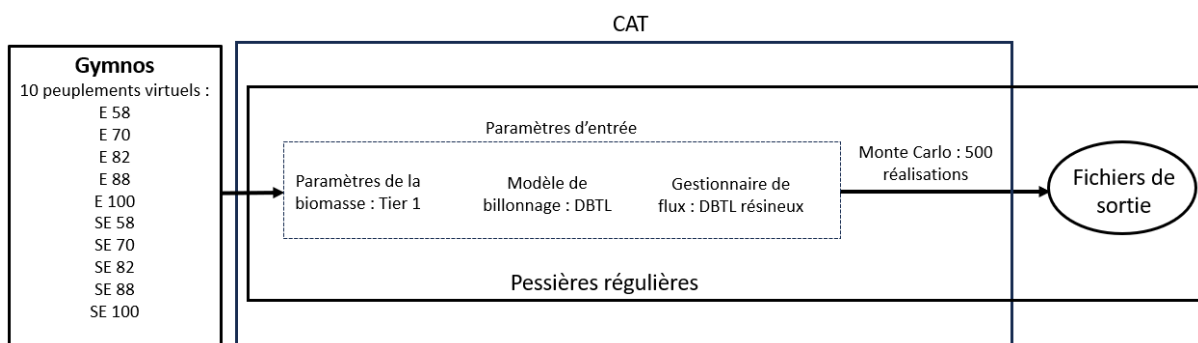


Figure 4 : Schéma illustrant la manière dont le logiciel CAT a été utilisé afin de pouvoir évaluer l'influence du scénario sylvicole sur le bilan carbone des pessières régulières. Les fichiers de sortie sont au format csv.

3. Résultats

3.1. Caractérisation de la filière bois wallonne

La valorisation des essences résineuses diffère considérablement de celle des essences feuillues (figure 5 et Annexe 7). Pour les feuillues, les bois d'industrie et d'énergie représentent ensemble 71% de la récolte. Ainsi, le bois de feuillues est principalement transformé en papier ou valorisé en énergie, contrairement au bois de résineux dont la majorité (95%) est dirigée vers les chantiers de découpe et les scieries. En plus de la récolte du volume bois fort tige, une part importante (62%) des branches fines est également récoltée pour les essences feuillues. Pour toutes les essences, les souches, les racines et le bois des arbres morts et des chablis sont laissés en forêt.

Les durées de vie moyennes, les émissions de CO₂ liée à la valorisation du bois et les facteurs de substitution diffèrent également entre les catégories de produits (tableau 5 et Annexe 6). La catégorie construction est celle avec la durée de vie la plus élevée (60 ans) et avec le plus grand facteur de substitution. Les catégories bois énergie et papier sont celles avec les durées de vie les plus courtes (1,7 et 2,8 ans respectivement) et avec les plus petits facteurs de substitution. Toutes les autres catégories de produits ont des durées de vie comprises entre 6,3 et 20 ans et des facteurs de substitution intermédiaires. Les catégories papier, MDF et panneaux de particules sont celles dont la production s'accompagne des plus grandes émissions de CO₂ (tableau 5).

Tableau 5 : Durées de vie moyennes, facteurs de substitution et émissions de CO₂ liées à la récolte, au transport et à la transformation du bois pour les différentes catégories de produits. Les émissions et les facteurs de substitution (FS) sont donnés pour une unité fonctionnelle (UF). Les valeurs en gras sont celles qui doivent être renseignées dans le logiciel CAT. Les colonnes grises ne sont pas utiles pour CAT mais facilitent la comparaison entre les différentes catégories de produits. Les sources des valeurs se trouvent en annexes (Annexe 6).

Catégorie de produits / valorisation	UF [m ³]	UF [kg]	Emissions [kg CO ₂ eq / UF]	Durée de vie moyenne [années]	FS [kg CO ₂ eq / UF]	Emissions [kg CO ₂ eq / kg]	FS [kg CO ₂ eq / kg]
Construction	1	394	44,2	60,0	980	0,11	2,49
Emballage, coffrage et transport	-	21	1,2	6,3	23	0,06	1,10
Menuiserie	1	383	32,6	15,0	367	0,09	0,96
Piquets, poteaux, tuteurs	1	383	27,8	15,0	421	0,07	1,10
Traverses de chemin de fer	1	615	27,8	20,0	677	0,05	1,10
MDF	1	543	158,1	20,0	718	0,29	1,32
Papier	-	1 000	440,0	2,8	/	0,44	/
Pellets	-	1 000	150,0	-	-	0,15	-
Bois énergie	-	1 000	70,0	-	-	0,07	-
- Cogénération	-	1 000	-	1,7	610	-	0,61
- Chauffage industriel	-	1 000	-	1,7	620	-	0,62
- Chauffage résidentiel	-	1 000	-	1,7	680	-	0,68
- Chauffage collectivités	-	1 000	-	1,7	630	-	0,63
Panneaux de particules	1	548	140,7	20,0	711	0,26	1,30

En accord avec la figure 5, les pourcentages du modèle BTL dans les catégories « bois de sciage » et « bois de trituration » sont respectivement de 95% et 5% pour les résineux et de 29% et 71% pour les feuillus. Pour le modèle DBTL, la proportion du volume commercial et le pourcentage de déclassés diffèrent entre feuillus et résineux, mais pas au sein de ces groupes (tableau 6).

Tableau 6 : Valeurs utilisées dans CAT pour le modèle de billonnage DBTL. Les bois déclassés sont valorisés comme bois d'industrie et d'énergie. Les valeurs en gras sont celles qui doivent être renseignées dans le logiciel CAT. La colonne « Dbh min. » indique le diamètre à hauteur d'homme (1,5m) minimum que l'arbre doit atteindre pour faire partie de la catégorie correspondant à ce diamètre. Les valeurs « par défaut » sont à renseigner dans le logiciel CAT pour les essences qui ne correspondent à aucune des autres catégories. Le nom scientifique du charme est *Carpinus betulus* L.

Essence	Catégorie CAT	Dbh min. (cm)	Circonférence min. (cm)	Volume commercial (%)	Pourcentage de déclassés (%)	Sources
Epicéa	Bois d'œuvre	28,5	90	85	0	H. Claessens, communication personnelle, 2023 ; FNEF, 2023 ; Perin <i>et al.</i> , 2016 ; Thyssen <i>et al.</i> , 2014
	Petit bois d'œuvre	19	60	85	0	
	Bois d'industrie et d'énergie	7	22	100	0	
Douglas, Mélèze	Bois d'œuvre	38	120	85	0	
	Petit bois d'œuvre	22	70	85	0	
	Bois d'industrie et d'énergie	7	22	100	0	
Charme	Bois d'œuvre	37,5	120	84	50	
	Petit bois d'œuvre	27,5	85	50	50	
	Bois d'industrie et d'énergie	7	22	100	0	
Chênes, Hêtre, Feuillus précieux	Bois d'œuvre	47,5	150	84	50	
	Petit bois d'œuvre	32	100	50	50	
	Bois d'industrie et d'énergie	7	22	100	0	
Par défaut	Bois d'œuvre	40	126	85	0	Pichancourt <i>et al.</i> , 2018
	Petit bois d'œuvre	27,5	85	40	0	
	Bois d'industrie et d'énergie	10	31	40	0	

Lorsqu'une coupe de bois de 100 m³ est réalisée respectivement dans un peuplement de feuillus et dans un peuplement de résineux, la quantité de carbone stockée dans les produits bois est plus importante, dans les premières années après la coupe, pour le peuplement de feuillus (figure 6), car une partie des rémanents est récoltée (figure 5). La tendance s'inverse toutefois très rapidement (après 3 ans dans le cas présent).

Dès le moment de la coupe, les émissions de CO₂ émises pour la valorisation du bois sont plus importantes pour les feuillus que pour les résineux (figure 7). Dans les premières années après la récolte, cette tendance s'accroît. A partir de l'année 18, l'écart entre les feuillus et les résineux se réduit, mais même 80 années après la récolte, les émissions de CO₂ associées à la valorisation du bois de la coupe unique initiale sont toujours plus élevées pour les feuillus que pour les résineux.

Pour une même récolte de bois, l'effet de substitution associé à la valorisation du bois de résineux est plus important que celui lié à la valorisation du bois de feuillus et cette différence s'accroît avec le temps (figure 7).

Même pour une coupe unique, les émissions de CO₂ et l'effet de substitution continuent d'évoluer au cours du temps, car lorsque des produits arrivent en fin de vie, le bois est soit valorisé en énergie, soit recyclé en de nouveaux produits.

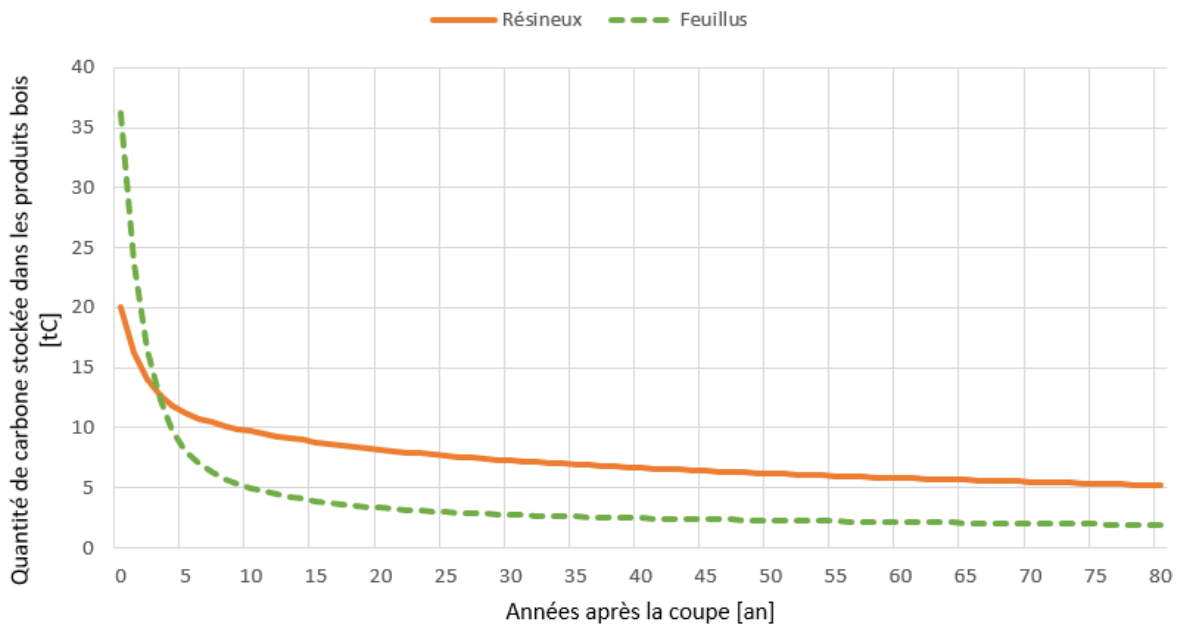


Figure 6 : Evolution au cours du temps de la quantité de carbone stockée dans les produits pour une coupe unique de 100 m³ de résineux et pour une coupe unique de 100 m³ de feuillus.

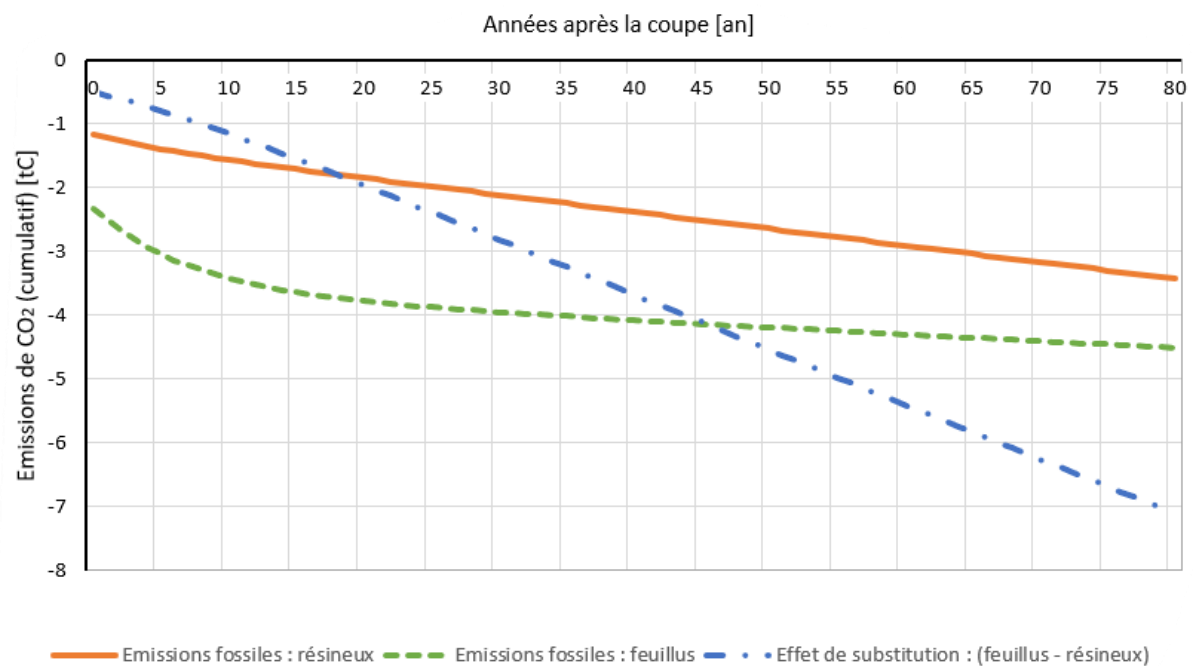


Figure 7 : Evolution au cours du temps des émissions cumulatives de CO₂ liées à la valorisation du bois et des émissions de CO₂ cumulatives évitées par effet de substitution pour une coupe unique de 100 m³ de résineux et une coupe unique de 100 m³ de feuillus. Les émissions de CO₂ liées à la valorisation du bois sont données séparément pour les résineux et pour les feuillus. Pour l'effet de substitution, la courbe correspond à la différence entre les valeurs pour les feuillus et les valeurs pour les résineux, car l'évaluation de l'effet de substitution n'a de sens que lorsque deux scénarios sont comparés. Les émissions de CO₂ liées à la valorisation du bois sont exprimées avec des valeurs négatives, tandis que les émissions évitées par substitution sont exprimées avec des valeurs positives. Ainsi, lorsque la courbe pour l'effet de substitution est sous l'axe des abscisses, cela signifie que l'effet de substitution est plus important pour les résineux que pour les feuillus.

3.2. Comparaison du bilan carbone d'une pessière régulière et d'une hêtraie jardinée

Excepté pour la biomasse vivante, la pessière régulière permet de stocker une plus grande quantité de carbone dans chaque réservoir que la hêtraie jardinée (figure 8 et tableau 7). Toutefois, en tenant compte de l'incertitude sur les paramètres d'entrée, seule la quantité de carbone stockée dans les produits bois est toujours plus importante pour la pessière régulière. Pour ce réservoir, la différence entre les deux peuplements est telle que la quantité de carbone stockée dans l'ensemble des réservoirs est aussi toujours plus élevée pour la pessière régulière (figure 8). L'effet de substitution est quant à lui toujours plus important pour la pessière régulière que pour la hêtraie jardinée, même en tenant compte de l'incertitude (figure 8).

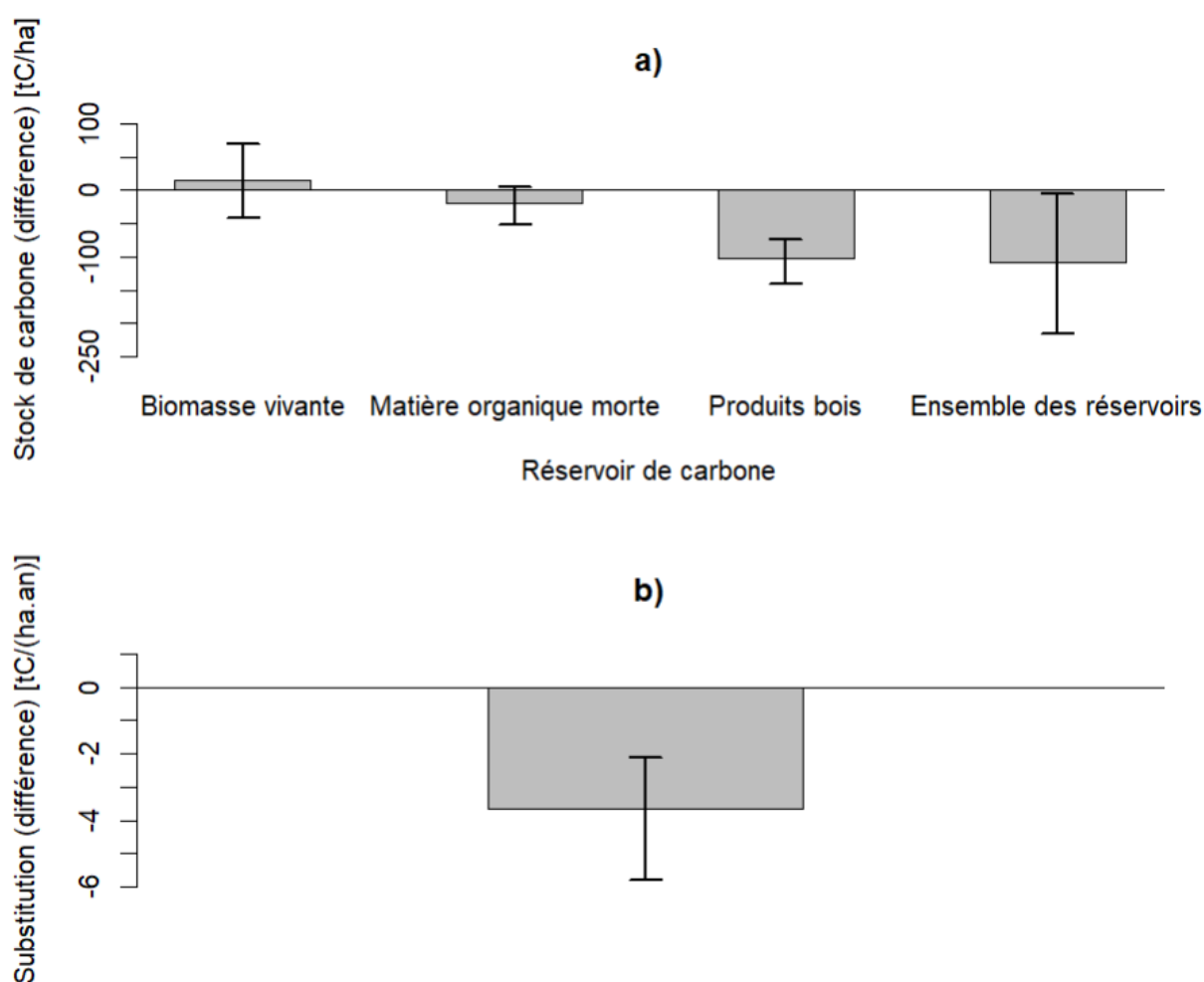


Figure 8 : Différences entre les quantités de carbone stockées dans les différents réservoirs (a) et entre les émissions de CO₂ évitées par substitution (b) pour une hêtraie jardinée et une pessière régulière. La hauteur des bâtonnets indique la différence moyenne pour les 500 réalisations de Monte Carlo et les barres d'erreurs indiquent les limites de l'intervalle de confiance (95% des réalisations). Une valeur positive indique que le stock ou l'effet de substitution est plus élevé pour la hêtraie jardinée que pour la pessière régulière.

Tableau 7 : Quantités de carbone stockées (en tonnes de carbone par hectare) dans les différents réservoirs et émissions évitées par effet de substitution (en tonnes de carbone par hectare et par an) pour une pessière régulière (R – première ligne) et pour une hêtraie jardinée (F – deuxième ligne). Les troisième et quatrième lignes reprennent respectivement les différences absolues (tC/ha pour les stocks et tC/(ha.an) pour les flux) et relatives (%) entre les quantités de carbone pour la hêtraie jardinée et la pessière régulière (F – R).

		Stocks de carbone				Flux de carbone
		Biomasse vivante	Matière organique morte	Produits bois	Ensemble des réservoirs	Substitution
R	tC/ha (stocks)	123,29	51,85	113,89	289,02	4,43
F	ou	137,47	31,97	11,49	180,93	0,77
F - R	tC/(ha.an) (flux)	14,18	-19,88	-102,40	-108,10	-3,66
F - R	%	11,51	-38,34	-89,91	-37,40	-82,68

Pour la pessière régulière, la quantité de carbone stockée dans les produits bois est presque aussi élevée que celle stockée dans la biomasse vivante, alors que pour la hêtraie jardinée, elle est plus de 10 fois plus faible (tableau 7). L'analyse du tableau 8 montre que le volume moyen annuel de récolte est pratiquement trois fois plus élevé pour la pessière régulière que pour la hêtraie jardinée. Par ailleurs, plus de la moitié (61%) du bois récolté dans la hêtraie jardinée est du bois d'industrie et d'énergie, alors que pour la pessière régulière, le bois d'œuvre et le petit bois d'œuvre représentent ensemble 78% de la récolte annuelle (tableau 8). Le MDF et le bois de construction représentent le débouché matériel le plus important pour le bois issu de la pessière régulière, alors que le bois issu de la hêtraie jardinée est en majorité transformé en papier. Dans les deux cas, la catégorie vers laquelle la plus grande part du volume de bois récolté est dirigée est la catégorie « bois énergie » (tableau 9).

Tableau 8 : Volume moyen annuel de bois récolté par catégorie ($m^3/(ha.an)$) et volume total de bois récolté lors des éclaircies et lors de la mise à blanc (m^3/ha) pour une pessière régulière (R) et pour une hêtraie jardinée (F). Le volume total est calculé sur une révolution (82 ans) pour la pessière régulière et sur une rotation de 12 ans pour la hêtraie jardinée. Les valeurs entre parenthèses indiquent la proportion de bois récolté dans chaque catégorie (%).

	Volume moyen annuel de récolte par catégorie [$m^3 / (ha.an)$]				Volume total récolté [m^3/ha]		
	Bois d'industrie et d'énergie	Petit bois d'œuvre	Bois d'œuvre	Total	Eclaircies	Mise à blanc	Total
R	3,31 (22 %)	1,63 (10 %)	10,7 (68 %)	15,64	560	723	1283
F	3,35 (61 %)	0,28 (5 %)	1,83 (34 %)	5,46	66	/	66

Tableau 9 : Répartition du volume de bois et des branches fines récoltés entre les différentes catégories de produits pour la pessière régulière (R) et la hêtraie jardinée (F). Les valeurs correspondent à la première valorisation du bois (le recyclage n'est pas pris en compte). Les volumes sont donnés en m^3 (partie supérieure du tableau) ou en pourcentages du total (% - partie inférieure du tableau).

		Répartition du volume total de bois récolté entre les catégories de produits						
		Menuiserie	Bois énergie	Construction + MDF	Emballages, coffrage et transport	Papier	Piquets, poteaux, tuteurs / traverses de chemin de fer	Total
R	m^3	25,21	588,33	498,82	126,03	8,37	36,00	1283
F		4,68	62,30	6,60	0,23	8,24	0,60	83
R	%	2	46	38	10	1	3	100
F		6	75	8	0	10	1	100

3.3. Influence du scénario sylvicole sur le bilan carbone des pessières régulières

Pour les scénarios avec des éclaircies, plus la révolution est longue, plus les quantités de carbone stockées dans la biomasse vivante et les produits bois sont grandes et plus l'effet de substitution est important (figure 9). Pour la matière organique morte, les différences sont toujours négatives (d'autant plus qu'on s'éloigne de la longueur de révolution du scénario de référence). Ceci implique que c'est pour le scénario de référence que la quantité de carbone stockée dans la matière organique morte est la plus élevée (tableau 10). Les quantités de carbone stockées dans l'ensemble des réservoirs suivent la même tendance que la biomasse vivante et les produits bois. Ainsi, au niveau du total des stocks et de l'effet de substitution, le classement des scénarios sylvicoles avec des éclaircies est le suivant : $E58 < E70 < E82 < E88 < E100$.

Pour tous les scénarios sans éclaircies, la quantité de carbone stockée dans la matière organique morte est plus importante que pour le scénario de référence et elle l'est d'autant plus que la révolution est longue. Excepté pour le scénario SE58, la tendance est la même pour la biomasse vivante (figure 9 et tableau 10). La quantité de carbone stockée dans les produits bois est toujours inférieure à la quantité pour le scénario de référence (surtout pour les longues révolutions) et il en va de même pour l'effet de substitution. Si cette tendance s'accroît avec les plus longues révolutions, c'est cependant pour le scénario SE70 – et non pour le scénario SE58 – que la quantité de carbone stockée dans les produits bois et que l'effet de substitution sont les plus élevés (tableau 10). Pour tous les scénarios sans éclaircies, le stock total est supérieur à celui pour le scénario de référence. Les différences sont d'autant plus grandes que les révolutions sont longues (figure 9). Le classement des scénarios sans éclaircies par rapport au scénario de référence est donc, au niveau du total des stocks : $E82 < SE58 < SE70 < SE82 < SE88 < SE100$ et, au niveau de la substitution : $SE100 < SE88 < SE82 < SE58 < SE70 < E82$.

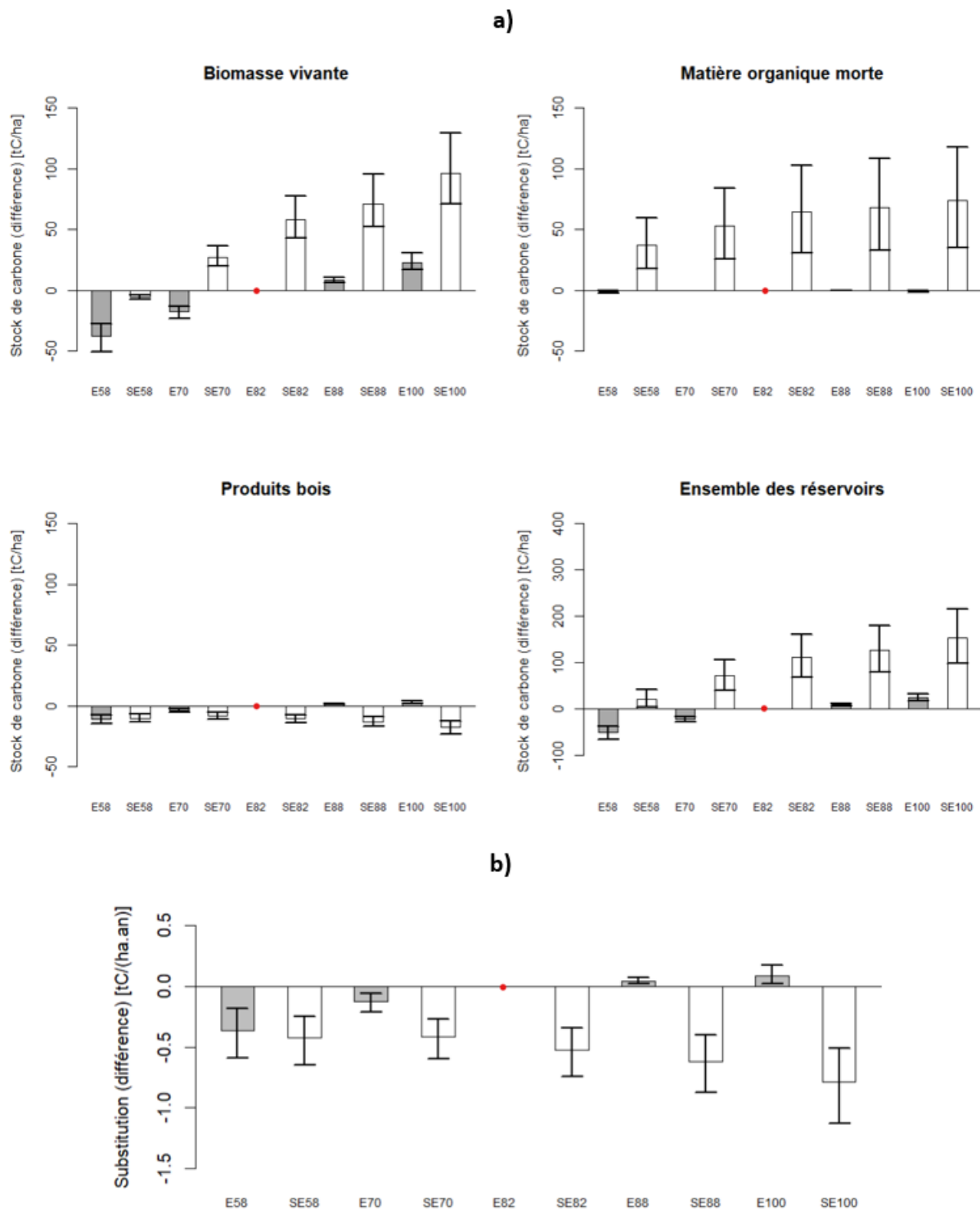


Figure 9 : Différences entre les quantités de carbone stockées (tC/ha) dans les différents réservoirs (a) et entre les émissions de CO₂ évitées par substitution (b) pour les neuf scénarios sylvicoles alternatifs et le scénario sylvicole de référence (E82) pour les pessières régulières. Les étiquettes sur l'axe des abscisses indiquent le régime d'éclaircies (E : scénarios contenant des éclaircies (bâtonnets gris) – SE : scénarios sans éclaircies (bâtonnets blancs)) et la durée de la révolution (58, 70, 82, 88 ou 100 ans) du scénario alternatif qui est comparé au scénario de référence. La hauteur des bâtonnets indique les différences moyennes pour les 500 réalisations de Monte Carlo et les barres d'erreurs indiquent les limites de l'intervalle de confiance (95% des réalisations). Une valeur positive indique que le stock de carbone est plus élevé pour le scénario alternatif que pour le scénario de référence. Pour faciliter l'interprétation, les bâtonnets sont classés par ordre croissant de longueur de révolution et un point rouge indique la position du scénario de référence.

Tableau 10 : Différences moyennes absolues (en tC/ha pour les stocks et en tC/(ha.an) pour les flux) et relatives (en %) entre les stocks et flux pour les peuplements alternatifs et pour le peuplement de référence (E82). La première ligne du tableau (ligne grise) reprend les valeurs pour le peuplement de référence. Ainsi, la valeur de 22,67 pour la ligne « E100 – E82 » et la colonne « biomasse vivante » signifie que le scénario E100 permet de stocker en moyenne 22,67 tC/ha en plus dans la biomasse vivante que le scénario E82 (la quantité de C stockée dans la biomasse vivante pour le scénario E100 est donc supérieure de 18,4 % par rapport au scénario E82). Les valeurs en gras indiquent que le scénario alternatif est plus intéressant, au niveau du stock ou du flux considéré, que le peuplement de référence.

		Stocks de carbone				Flux de carbone
		Biomasse vivante	Matière organique morte	Produits bois	Ensemble des réservoirs	Substitution
E82		123,19	51,33	114,66	289,18	4,36
E100 - E82	tC/ha (stocks) ou tC/(ha.an) (flux)	22,67	-0,89	2,76	24,54	0,08
E88 - E82		8,07	-0,18	1,27	9,16	0,04
E70 - E82		-17,59	-0,04	-3,84	-21,47	-0,12
E58 - E82		-37,69	-1,21	-11,09	-50,00	-0,36
SE100 - E82		96,34	74,07	-17,86	152,55	-0,79
SE88 - E82		71,29	68,28	-13,15	126,42	-0,62
SE82 - E82		57,89	64,66	-10,69	111,85	-0,53
SE70 - E82		27,31	53,04	-8,22	72,13	-0,42
SE58 - E82		-5,39	37,45	-10,20	21,87	-0,42
E100 - E82		%	18,40	-1,74	2,40	8,48
E88 - E82	6,55		-0,36	1,11	3,17	0,92
E70 - E82	-14,28		-0,08	-3,35	-7,42	-2,84
E58 - E88	-30,60		-2,36	-9,67	-17,29	-8,31
SE100 - E82	78,20		144,31	-15,57	52,75	-18,14
SE88 - E82	57,87		133,02	-11,46	43,72	-14,16
SE82 - E82	46,99		125,97	-9,33	38,68	-12,08
SE70 - E82	22,17		103,34	-7,17	24,94	-9,61
SE58 - E82	-4,38		72,97	-8,89	7,56	-9,71

Parmi les dix scénarios, c'est le scénario E82 qui permet d'atteindre le volume de récolte annuel moyen le plus élevé (15,64 m³/(ha.an)), mais les valeurs pour les autres scénarios avec éclaircies sont similaires (tableau 11). Pour les scénarios sans éclaircies, la valeur est plus faible, d'autant plus que la révolution est longue. Plus la révolution est longue, plus la part du bois récoltée lors des éclaircies augmente, pour atteindre 48 % du volume total pour le peuplement E100. La catégorie de bois la plus représentée est le bois d'œuvre, suivie du bois d'industrie et d'énergie et, en dernier lieu, du petit bois d'œuvre. Dans les scénarios SE100, SE88 et SE82, la part de bois d'œuvre atteint 85 % du total. Excepté pour le scénario SE58, la part de bois d'œuvre produite est toujours plus importante pour les scénarios sans éclaircies que pour les scénarios qui contiennent des éclaircies (tableau 11).

Tableau 11 : Répartition, pour les 10 scénarios sylvicoles, du volume moyen annuel de bois récolté par catégorie [$m^3/(ha.an)$] et du volume total de bois récolté [m^3/ha] lors des éclaircies et lors de la mise à blanc. La partie inférieure du tableau reprend les mêmes valeurs mais en pourcentages du total. Le volume total est calculé sur une révolution (58, 70, 82, 88 ou 100 ans).

		Volume moyen annuel de récolte				Volume total récolté sur une révolution		
		Bois d'industrie et d'énergie	Petit bois d'œuvre	Bois d'œuvre	Total	Eclaircies	Mise à blanc	Total
E100	m ³ /(ha.an) (volume moyen annuel) ou m ³ /ha (volume total)	3,10	1,34	10,94	15,38	742	796	1538
E88		3,24	1,52	10,83	15,59	620	752	1372
E82		3,31	1,63	10,70	15,64	560	723	1283
E70		3,48	1,91	10,24	15,62	431	662	1093
E58		3,65	2,35	9,24	15,25	295	590	884
SE100		1,86	0,00	10,54	12,40	0	1240	1240
SE88		1,95	0,00	11,06	13,01	0	1145	1145
SE82		2,00	0,00	11,32	13,32	0	1092	1092
SE70		2,07	0,43	11,33	13,83	0	968	968
SE58		2,24	2,09	10,06	14,39	0	835	835
E100	%	20	9	71	100	48	52	100
E88		21	10	69	100	45	55	100
E82		21	11	68	100	44	56	100
E70		22	12	66	100	39	61	100
E58		24	15	61	100	33	67	100
SE100		15	0	85	100	0	100	100
SE88		15	0	85	100	0	100	100
SE82		15	0	85	100	0	100	100
SE70		15	3	82	100	0	100	100
SE58		15	15	70	100	0	100	100

La répartition du volume de bois récolté et du volume de bois recyclé entre les différentes catégories de produits est similaire pour tous les scénarios étudiés (voir Annexe 8).

4. Discussion

4.1. Caractérisation de la filière bois wallonne

Analyse et interprétation des résultats

Pour un même volume de bois exploité, les quantités de carbone stockées dans les produits bois et les émissions de CO₂ évitées par substitution sont plus importantes pour les essences résineuses que pour les essences feuillues. En outre, les émissions de CO₂ liées à la valorisation du bois sont plus élevées pour les essences feuillues. En ce sens, la partie de la filière bois qui valorise les essences résineuses peut être considérée comme plus performante, au niveau du bilan carbone, que la partie qui valorise les essences feuillues. Plusieurs éléments peuvent être avancés pour expliquer cette différence.

Premièrement, la proportion du bois transformé en produits à longue durée de vie est plus importante pour les essences résineuses que pour les essences feuillues. Les produits peuvent être regroupés en trois catégories en fonction de la durée de vie (tableau 5) : ceux avec une longue durée de vie (la catégorie « construction »), ceux dont la durée de vie est moyenne (les catégories « menuiserie », « traverses de chemin de fer », « panneaux de particules », « MDF » et « piquets, poteaux et tuteurs ») et ceux avec une courte durée de vie (les catégories « bois énergie », « papier » et « emballage, coffrage et transport »). Sur base des flux de la figure 5, la répartition du bois entre ces trois grandes catégories est de respectivement 25%, 12% et 15% pour les résineux et de respectivement 5%, 7% et 68% pour les feuillus²³. La décroissance rapide du stock de carbone dans les produits bois observée pour les feuillus s'explique par la présence d'une quantité importante de produits à courte durée de vie (figure 6). Ceci a également été mis en évidence dans d'autres études (Chen *et al.* (2008) ; Fortin *et al.* (2012)).

Deuxièmement, les produits bois avec les plus grands facteurs de substitution sont en majorité obtenus à partir de bois de résineux. La proportion entre les résineux et les feuillus dans la catégorie avec le plus grand FS, soit la catégorie « construction », est de 5/1. La seconde catégorie avec le plus grand SF est la catégorie « MDF » qui, selon les flux de la figure 5, est produit exclusivement à partir de bois de résineux. Par ailleurs, la majorité du bois de feuillus est valorisée en énergie (catégorie avec les SF les plus bas) ou transformée en papier (produit pour lequel il n'y a pas d'effet de substitution). L'évolution au cours du temps de la différence entre les émissions de CO₂ évitées par substitution pour les feuillus et pour les résineux (figure 7) indique que cette différence se maintient aussi dans la phase de recyclage.

Troisièmement, les produits qui sont majoritairement réalisés à partir de bois de feuillus sont ceux dont la production s'accompagne des plus grandes émissions de CO₂. Par kg de produit, c'est pour le papier que les émissions sont les plus élevées (0,44 kgCO₂eq/kg). La valeur pour la catégorie « MDF » est également assez élevée (0,29 kgCO₂eq/kg), mais contrairement à la production de papier, qui représente 14% de l'utilisation du bois de feuillus, la part du bois de résineux utilisée pour la production de MDF est marginale (< 4%). L'augmentation rapide des émissions de CO₂ liées à la transformation du bois de feuillus (figure 7) dans les premières années après la coupe est liée à l'importante production de papier. Une fois que la majorité du papier a été éliminée du système (valorisation en cogénération), les émissions de CO₂ liées à cette production diminuent. Pour les

²³ Il s'agit de la répartition initiale (sans prendre en compte le recyclage) et sans mentionner les produits connexes, qui représentent respectivement 48% et 20% pour les résineux et pour les feuillus. Pour les résineux, c'est d'ailleurs cette grande proportion de produits connexes, dont 47% sont valorisés en énergie (figure 5) qui permet d'expliquer pourquoi la catégorie « bois énergie » est tant approvisionnée (tableau 9).

résineux, les émissions de CO₂ sont presque constantes au cours du temps, car les produits bois en fin de vie sont en grande partie recyclés en panneaux de particules, dont la production émet également une quantité importante de CO₂ (tableau 5).

Discussion autour des valeurs utilisées pour caractériser la filière bois

Caractériser la filière bois wallonne nécessite de combiner des données provenant de nombreuses sources, calculées pour des années différentes et avec des méthodes différentes. Les estimations d'experts sont intéressantes pour pallier le problème des données manquantes, mais les valeurs fournies ne sont que des approximations. Même dans un ouvrage comme le Panorabois (OEWB, 2021), il est mentionné que certaines informations peuvent être entachées d'erreurs. Les valeurs de la figure 5 et du tableau 5 le sont également. Toutefois, pour beaucoup de valeurs, l'influence d'une erreur sur le bilan carbone total est négligeable (Vallet *et al.*, 2009). C'est probablement moins vrai pour les taux de recyclages, qui peuvent influencer significativement le stock de carbone dans les produits bois. Or, pour le MDF et les panneaux de particules, ces taux ont été particulièrement difficiles à obtenir (notamment car les différentes sources se contredisent) et il se peut donc que les valeurs de la figure 5 soient éloignées des valeurs réelles.

Les FS retenus pour cette étude se positionnent parmi les plus basses valeurs de la littérature. En effet, en convertissant ces SF en DF, les valeurs pour la substitution matérielle sont comprises entre 0,6 et 1,36 et les valeurs pour la substitution énergétique sont comprises entre 0,33 et 0,37 (Annexe 6). Or, pour rappel, les méta-analyses de Sathre & O'Connor (2010) et de Geng *et al.* (2017) ont mis en évidence que les DF pour la substitution matérielle se situent entre 0,25 et 5,6 et que les DF pour la substitution énergétique se situent entre < 0,5 et environ 1.

La précision des données collectées pour caractériser la filière bois peut s'avérer insuffisante pour une évaluation dans le cadre des rapports nationaux. Toutefois, si l'objectif est de comparer des scénarios, l'utilisation de la méthode de Monte Carlo en accord avec les marges d'erreur du GIEC permet de garantir une certaine fiabilité des résultats²⁴. En pratique, toutes les études sont confrontées au même problème et les auteurs mentionnent explicitement ou implicitement que la fiabilité des résultats pourrait être augmentée si des valeurs plus précises sur la filière bois locale étaient disponibles (Fortin *et al.*, 2012 ; Klein *et al.*, 2013 ; Jasinevičius *et al.*, 2018 ; Vallet *et al.*, 2009).

²⁴ Seule la prise en compte de l'incertitude liée aux émissions de CO₂ n'est pas encore implémentée dans le logiciel CAT. Ce n'est cependant pas problématique pour cette étude, car lorsque deux scénarios sont comparés, seule la substitution doit être prise en compte (voir point 1.2.1.)

4.2. Comparaison du bilan carbone d'une pessière régulière et d'une hêtraie jardinée

En moyenne, la pessière régulière permet de stocker 108,10 tC/ha en plus que la futaie jardinée et ceci s'explique presque uniquement avec la différence dans les produits bois. En effet, la quantité de carbone stockée dans les produits bois est plus de 10 fois plus importante pour le peuplement de résineux que pour le peuplement de feuillus. Cette différence peut être expliquée d'une part par la différence dans les volumes moyens annuels de récolte (15,64 m³/(ha.an) en résineux et 5,46 m³/(ha.an) en feuillus, tableau 8) et d'autre part par la différence de valorisation du bois. La proportion des différentes catégories de bois (tableau 8) et leur répartition entre les différentes catégories de produits (tableau 9) indique d'ailleurs que les conclusions de la section 4.1 s'appliquent également ici aussi. Ces deux éléments permettent également d'expliquer pourquoi l'effet de substitution est en moyenne plus élevé de 3,64 tC/(ha.an) pour le peuplement de résineux.

Même en intégrant les incertitudes selon les recommandations du GIEC (voir section 2.2.3.), le peuplement de résineux est plus intéressant, au niveau du stock total de carbone et de l'effet de substitution, que le peuplement de feuillus. Klein *et al.* (2013) étaient arrivés à la même constatation dans leur comparaison de l'épicéa et du hêtre en Allemagne.

Les résultats obtenus pour le peuplement de feuillus (des stocks de carbone de 137,47, de 31,97, de 11,49 et de 180,93 tC/ha respectivement pour la biomasse vivante, la matière organique morte, les produits bois et l'ensemble des réservoirs) sont en accord avec les résultats d'autres études. Pour des peuplements de chêne sessile, Vallet *et al.* (2009) ont obtenu un stock moyen à l'équilibre de 117 tC/ha pour la biomasse vivante et de 11tC/ha pour les produits bois. Pour la même espèce, Fortin *et al.* (2012) ont obtenu un stock de carbone moyen à l'équilibre compris entre 83,8 tC/ha et 129,7 tC/ha pour la biomasse vivante et la matière organique morte et un stock de carbone moyen compris entre 7,7 et 10,1 tC/ha pour les produits bois. Vallet *et al.* (2009) n'ont pas calculé l'effet de substitution, par manque de données. Par contre, l'effet de substitution moyen estimé par Fortin *et al.* (2012) est d'environ 0,6 tC/(ha.an), ce qui est à nouveau similaire à la valeur obtenue dans cette étude (0,77 tC/(ha.an)).

Les résultats obtenus pour le peuplement de résineux (des stocks de carbone de 123,29, de 51,85, de 113,89 et de 289,02 tC/ha respectivement pour la biomasse vivante, la matière organique morte, les produits bois et l'ensemble des réservoirs) sont plus élevés que ceux obtenus par Vallet *et al.* (2009) pour des plantations de pin laricio (en moyenne 69 tC/ha pour la biomasse vivante et 15 tC/ha pour les produits bois). Les auteurs précisent cependant que leur valeur pour les produits bois semble faible. Liski *et al.* (2001) ont estimé que la quantité de carbone stockée dans les produits bois en utilisation et en décharge pour des plantations de pin sylvestre et d'épicéa commun en Finlande serait comprise entre 66 tC/ha et 98 tC/ha. Pour des plantations d'épicéas en Allemagne, Klein *et al.* (2013) ont obtenu un stock moyen dans les produits bois de 72,8 tC/ha. Ces deux derniers ordres de grandeur sont plus en accord²⁵ avec la valeur obtenue dans cette étude. Pour l'effet de substitution, Klein *et al.* (2013) ont obtenu une valeur de 2,6 tC/(ha.an) pour l'épicéa. En pondérant par rapport au stock de carbone dans les produits bois, la valeur est similaire à celle trouvée dans cette étude (4,43 tC/(ha.an)).

En pratique, la comparaison des résultats est complexe, car ils sont hautement dépendants de la productivité des peuplements ainsi que de la filière bois et du mix énergétique local.

²⁵ Et également plus logiques par rapport au stock de 11,49 tC/ha dans les produits bois pour la hêtraie jardinée, compte tenu de la différence dans les volumes récoltés et des conclusions de la section 4.1.

Le volume moyen annuel de récolte pour la pessière régulière, soit 15,64 m³/(ha.an) (tableau 8), correspond bien à la valeur centrale des accroissements moyens annuels en volume depuis la plantation pour les pessières en Wallonie (Perin *et al.*, 2016). Pour la hêtraie jardinée, le volume moyen annuel de récolte est de 5,46 m³/(ha.an). Comme la récolte est égale à l'accroissement, la hêtraie simulée correspond aussi à la situation moyenne des hêtraies en Wallonie pour ce type de régime (Alderweireld *et al.*, 2015). Ainsi, les deux peuplements simulés semblent être bien représentatifs de la situation moyenne.

Si le changement climatique et les dégâts biotiques et abiotiques avaient été pris en compte, les résultats auraient probablement été très différents. La plupart des études citées dans ce mémoire n'en tiennent également pas compte, car leur influence sur les stocks et flux de carbone est en pratique difficile à évaluer. C'est notamment le cas de Fortin *et al.* (2012). Toutefois, il est raisonnable de considérer que les peuplements de chêne sessile du Nord de la France auxquels ils s'intéressent sont moins à risque que les pessières régulières wallonnes. Vallet *et al.* (2009) ignorent également ces deux éléments dans une comparaison entre le chêne sessile et le pin laricio dans le Sud de la France, situation qui se rapproche davantage de la comparaison entre les pessières et les hêtraies wallonnes. Les deux études mentionnent que leurs résultats et conclusions doivent être considérés comme des premières indications et non comme des recommandations. De manière similaire, les résultats obtenus dans cette étude indiquent que les quantités de carbone stockées et l'effet de substitution peuvent être plus importants pour les pessières régulières que pour les hêtraies jardinées. Toutefois, sans intégrer le changement climatique et le risque de dégâts, des recommandations ne peuvent être émises. Cependant, compte tenu des différences importantes dans le stock de carbone dans les produits bois et dans l'effet de substitution, il semble peu probable que le remplacement des pessières régulières par des futaies jardinées feuillues observé actuellement (Latte *et al.*, 2022) soit favorable pour le bilan carbone du secteur forestier en Wallonie.

4.3. Influence du scénario sylvicole sur le bilan carbone des pessières régulières

Pour les scénarios avec des éclaircies, les plus longues révolutions sont plus intéressantes, au niveau du stock total de carbone et de l'effet de substitution, que les plus courtes révolutions. Même si les différences absolues sont faibles (tableau 10), la prise en compte de l'incertitude ne change pas les conclusions²⁶ (figure 9). Parmi les différents réservoirs, seule la matière organique morte ne suit pas cette tendance, mais les différences sont marginales. Le scénario de référence (E82) est celui qui permet de stocker la plus grande quantité de carbone dans ce réservoir, car c'est celui avec le volume annuel moyen de récolte le plus élevé (tableau 11). Or, comme l'épicéa est la seule essence analysée ici, les valeurs pour le modèle de billonnage sont les mêmes pour tous les peuplements, ce qui signifie que la quantité de bois mort est quasi exclusivement dictée par le volume de bois récolté²⁷.

Par rapport au scénario de référence, les scénarios sans éclaircies jusqu'à la mise à blanc sont plus intéressants au niveau du stock total de carbone, mais moins intéressants au niveau de l'effet de substitution. Cette conclusion est valable pour toutes les longueurs de révolution étudiées, mais les différences sont moins prononcées pour les scénarios avec les plus courtes longueurs de révolutions, car ce sont celles avec les volumes moyens annuels de récolte les plus élevés (tableau 11). La quantité de carbone stockée dans les produits bois et l'effet de substitution sont toutefois plus élevés pour le scénario SE70 que pour le scénario SE58, car la plus grande part de bois d'œuvre compense la diminution du volume de récolte annuel moyen.

L'analyse du tableau 11 révèle également que la proportion de bois d'œuvre est plus importante pour les scénarios sans éclaircies que pour les scénarios avec éclaircies (pour autant que la longueur de révolution ne soit pas trop courte : ≥ 70 ans). En effet, même si l'accroissement en diamètre est moins important dans les peuplements avec éclaircies, les arbres ont tout de même le temps, lors des longues révolutions, d'atteindre le diamètre minimal pour être considérés dans la catégorie bois d'œuvre (tableau 6). Toutefois, excepté pour le scénario SE70, cette plus grande proportion de bois d'œuvre n'est pas suffisante pour compenser l'impact de la baisse du volume moyen annuel récolté sur le stock de carbone dans les produits bois.

Les valeurs obtenues pour le peuplement de référence (E82) sont sensiblement les mêmes que celles obtenues pour la pessière régulière de la section 3.2. Ainsi, la discussion autour des résultats de la section précédente (section 4.2) est également d'application pour cette partie. Pour les scénarios sans éclaircies, les stocks totaux de carbone sont considérablement plus élevés que celui du scénario de référence. Au total, le stock moyen en séquence infinie du peuplement SE100 est de 441,73 tC/ha, dont 344,93 tC/ha dans la biomasse vivante et la matière organique morte. Ceci est en accord avec les résultats obtenus par Klein *et al.* (2013) : pour une pessière d'une centaine d'années dans laquelle aucune récolte de bois n'a été effectuée, les auteurs obtiennent, pour le stock de carbone dans la biomasse vivante et la matière organique morte, une valeur avoisinant les 350 tC/ha.

Pour l'épicéa commun en Finlande, les résultats obtenus par Liski *et al.* (2001) indiquent que, pour les scénarios avec des éclaircies, les stocks de carbone sont légèrement plus élevés pour les courtes révolutions (60 ans) que pour les longues révolutions (120 ans). Comme mis en évidence ici, la quantité de carbone stockée dans la biomasse vivante est moins élevée pour les courtes révolutions.

²⁶ En effet, comme l'essence est la même pour tous les peuplements, les paramètres de la biomasse propres à l'essence (tableau 2) sont identiques pour les réalisations de Monte Carlo portant le même numéro et les barres d'erreurs sont donc plus petites qu'à la figure 8.

²⁷ En pratique, avec le modèle de billonnage utilisé, la proportion de bois d'industrie et d'énergie influence aussi le stock de carbone dans la matière organique morte, mais comme elle est pratiquement la même pour les cinq scénarios sans éclaircies (tableau 11), son influence est négligeable.

Cependant, Liski *et al.* (2001) ont montré que les quantités de carbone stockées dans la matière organique morte et les produits bois sont moins élevées pour les courtes révolutions. Toutefois, dans les simulations de Liski *et al.* (2001), la diminution de la longueur de révolution s'accompagne d'un plus grand volume de récolte annuel moyen et d'une plus grande proportion de bois de trituration, ce qui permet d'expliquer pourquoi leurs résultats indiquent que le stock de carbone dans la matière organique morte est plus élevé pour les courtes révolutions. Par ailleurs, Liski *et al.* (2001) mentionnent que la plus grande proportion du bois de sciage pour les longues révolutions ne suffit pas pour compenser la baisse dans le volume annuel moyen récolté, ce qui ne semble pas être le cas ici.

Les résultats de la section 3.3 indiquent qu'augmenter la longueur de révolution dans les pessières gérées avec des éclaircies est une mesure théoriquement favorable pour le bilan carbone. Toutefois, comme les différences absolues sont faibles et que le risque de dégâts est accru pour les plus longues révolutions (Fortin *et al.*, 2012), il est peu probable qu'une telle mesure puisse être réellement favorable en pratique.

La comparaison entre les cinq scénarios sans éclaircies et le scénario de référence conduit au même dilemme que celui présenté à la section 1.2.2 : les scénarios sans éclaircies permettent de stocker plus de carbone dans l'écosystème que le scénario de référence, mais d'éviter moins d'émissions de CO₂ par effet de substitution. Cette tendance ne fait que s'accroître avec l'augmentation de la longueur de révolution, car au plus la révolution est longue, au plus le peuplement s'apparente à un peuplement non géré. En faisant abstraction du changement climatique et du risque de dégâts, le scénario à favoriser dépend donc de l'échelle temporelle et de l'importance accordée à la substitution (voir section 1.2.2). En pratique, ne pas réaliser d'éclaircies dans des pessières régulières pourrait s'accompagner d'importants problèmes de stabilité, surtout pour les longues révolutions (Fortin *et al.*, 2012). Il semble donc peu probable qu'un tel changement par rapport au régime d'éclaircies conventionnel puisse s'avérer bénéfique pour le bilan carbone des pessières régulières en Wallonie, même à court terme.

4.4. Perspectives

Les données récoltées pour caractériser la filière bois wallonne en vue d'une utilisation avec le logiciel CAT ont permis de créer quatre fichiers qui peuvent être réutilisés²⁸ pour répondre à d'autres questions de recherche sur le bilan carbone du secteur forestier en Wallonie. De manière similaire à ce qui a été fait dans cette étude, le logiciel CAT pourrait être réutilisé pour étudier par exemple l'impact de la transition des pessières régulières vers une structure plus irrégulière sur le bilan carbone. Une autre possibilité intéressante serait d'évaluer, de manière absolue, les stocks et flux de carbone de l'ensemble du secteur forestier en Wallonie. Plusieurs pays ou régions ont déjà entrepris une telle évaluation (voir Geng *et al.*, 2017).

La caractérisation de la filière bois wallonne a été réalisée avec un maximum de rigueur compte tenu des contraintes temporelles de l'étude. Néanmoins, des études visant à quantifier plus précisément les flux de bois au sein de la filière et les facteurs de substitution, durées de vie et émissions de CO₂ liées aux produits bois permettraient d'augmenter significativement la fiabilité du bilan carbone. Au niveau des flux, une attention particulière devrait être portée aux taux de recyclage des panneaux de particules et du MDF.

Comme le choix de la stratégie à favoriser peut dépendre de l'importance accordée à la substitution, il serait intéressant, compte tenu des critiques à son égard, d'évaluer dans quelle mesure des émissions de CO₂ sont réellement évitées par effet de substitution. Une telle évaluation serait cependant complexe à réaliser et nécessiterait d'estimer l'impact d'une plus grande utilisation du bois sur l'utilisation des matériaux alternatifs.

Les conclusions qui émanent de cette étude sont difficilement généralisables à l'ensemble de la Wallonie, car le contexte climatique changeant et le risque de dégâts biotiques et abiotiques rendent les résultats incertains. A l'avenir, les comparaisons du bilan carbone lié à différentes stratégies de gestion forestière ne devraient pas, dans la mesure du possible, faire abstraction du changement climatique et du risque de dégâts. Par ailleurs, il serait également intéressant de développer un modèle pour tenir compte du carbone dans le sol.

Même si des recommandations avaient pu être formulées, elles ne tiendraient compte que de l'aspect carbone. Or, le lien entre le bilan carbone du secteur forestier et l'impact sur le changement climatique n'est pas direct²⁹ (Luyssaert *et al.*, 2018). Par ailleurs, le rôle que le secteur forestier peut jouer dans l'atténuation du changement climatique n'est qu'un des services écosystémiques de la forêt. Avant de formuler des recommandations, il faudrait donc également évaluer les aspects sociaux, économiques et environnementaux de l'impact d'un changement de scénario sylvicole.

En pratique, la grande majorité des études citées dans ce mémoire ignorent également les aspects climatiques, les perturbations biotiques et abiotiques et les aspects sociaux, économiques et environnementaux. En effet, la caractérisation de la filière bois est complexe à réaliser et les contraintes de l'étude impliquent de se concentrer uniquement sur l'aspect carbone. Même si elles ne permettent pas toujours de formuler des recommandations, ces études, en mettant en évidence les zones d'incertitudes et des grandes tendances, sont en quelque sorte les fondations d'un travail plus conséquent.

²⁸ Les quatre fichiers sont disponibles dans le matériel supplémentaire de ce mémoire. La structure et la composition de ce matériel supplémentaire est décrite en annexes (Annexe 9).

²⁹ En effet, les stratégies qui visent à optimiser le potentiel de séquestration du carbone du secteur forestier peuvent avoir un impact négatif sur d'autres éléments qui impactent le bilan énergétique de la planète, notamment sur l'albédo (Luyssaert, 2018).

De cette étude, il ressort clairement que, actuellement, la valorisation des essences résineuses permet de stocker plus de carbone dans les produits bois et d'éviter, au moins en théorie, plus d'émissions de CO₂ par effet de substitution que la valorisation des essences feuillues. Ainsi, même sans prendre en compte les aspects liés à la gestion forestière, il y a là une opportunité intéressante d'amélioration. En effet, tenter de mieux valoriser le bois des essences feuillues, notamment par un allongement de la durée de vie des produits et par une réduction des émissions de CO₂ liées à leur production pourrait permettre d'améliorer significativement le bilan carbone du secteur forestier.

4.5. Contribution personnelle de l'étudiant

Sur base d'un sujet d'intérêt commun avec ses promoteurs, l'étudiant a réalisé une recherche bibliographique pour déterminer ce qu'il était possible et pertinent de faire dans le cadre d'un mémoire. En plus de servir de base de discussion pour déterminer les objectifs avec les promoteurs, cette recherche bibliographique a permis de mettre en évidence les stocks et flux de carbone à prendre en compte ainsi que les points d'attention et de faire un état de l'art sur le sujet.

Pendant les quatre premiers mois de travail, l'étudiant a effectué des recherches et pris contact avec les professionnels de la filière bois wallonne pour collecter toutes les données nécessaires à la réalisation de la figure 5 et du tableau 5.

A partir du mois de juin, l'étudiant a réalisé en autonomie les simulations avec le logiciel CAT et avec la plateforme CAPSIS4, tout en bénéficiant ponctuellement de l'aide des développeurs des modèles et du logiciel utilisés.

Ce mémoire a été réalisé dans la continuité du travail de Wohlfrom (2022), qui a donc servi de base à la fois pour la caractérisation de la filière bois wallonne et pour la prise en main du logiciel de comptabilité carbone.

5. Conclusion

Depuis que de nombreux pays se sont engagés à réduire leurs émissions de GES, le secteur forestier est considéré comme un élément important dans la recherche de solutions pour atteindre les différents objectifs climatiques fixés. Pour que des décisions appropriées puissent être prises, des études visant à déterminer les stratégies de gestion forestière et d'utilisation du bois à favoriser sont nécessaires. Pour l'utilisation du bois, il semble admis que la stratégie la plus intéressante soit de favoriser les produits à longue durée de vie et un système en cascade. En ce qui concerne la gestion forestière, la stratégie à favoriser est plus complexe à déterminer, car celle-ci dépend du contexte environnemental et climatique local. La comparaison du bilan carbone de différents scénarios peut être avantageusement effectuée à l'aide d'un logiciel de comptabilité carbone, ce qui implique de caractériser la filière bois locale. L'objectif de cette étude était de caractériser la filière bois wallonne de manière à pouvoir utiliser le logiciel CAT pour évaluer, à l'échelle de la Wallonie, l'influence de la gestion forestière sur le bilan carbone du secteur forestier. Deux aspects de la gestion forestière ont été évalués : le choix de l'essence (avec une comparaison entre une pessière régulière et une hêtraie jardinée) et, pour les pessières régulières, l'influence d'un changement dans la longueur de révolution et dans le régime d'éclaircies.

L'objectif de la caractérisation de la filière bois était d'établir les flux relatifs au sein de la filière et de caractériser les différents produits bois qui en sont issus avec une durée de vie, un facteur de substitution et les émissions de CO₂ qui sont liées à leur production. La valorisation des essences résineuses permet actuellement de stocker plus de carbone dans les produits bois et d'éviter plus d'émissions de CO₂ par effet de substitution que la valorisation des essences feuillues. Contrairement aux essences résineuses, le bois des essences feuillues est actuellement majoritairement transformé en produits à courte durée de vie, dont la production s'accompagne d'importantes émissions de CO₂ et avec un effet de substitution faible voire inexistant.

Pour le choix de l'essence, les résultats indiquent que la pessière régulière simulée permet de stocker, en moyenne et à l'équilibre, 108,1 tC/ha de plus que la hêtraie jardinée. Par ailleurs, l'effet de substitution est de 3,64 tC/(ha.an) plus élevé pour la pessière régulière. En faisant abstraction du changement climatique et des dégâts biotiques et abiotiques, les pessières régulières s'avèrent donc être plus intéressantes, au niveau du bilan carbone, que les hêtraies jardinées.

Dans les pessières régulières gérées conventionnellement, augmenter la longueur de révolution est une mesure théoriquement favorable pour le bilan carbone. Toutefois, comme les différences absolues sont faibles et que le risque de dégâts est accru pour les plus longues révolutions, il est peu probable qu'une telle mesure puisse avoir une influence positive significative sur le bilan carbone. Par rapport aux pessières gérées conventionnellement, les scénarios de gestion sans éclaircies permettent de stocker plus de carbone dans l'écosystème, mais d'éviter moins d'émissions de CO₂ par effet de substitution. Le scénario à favoriser pour le bilan carbone dépend donc de l'échelle temporelle et de l'importance accordée à la substitution. Compte tenu des problèmes de stabilité dans les peuplements sans éclaircies, il semble toutefois peu probable qu'un tel changement puisse s'avérer bénéfique pour le bilan carbone des pessières régulières en Wallonie, même à court terme.

D'autres études qui viseraient à améliorer la précision de la caractérisation de la filière bois, à évaluer l'influence réelle de l'effet de substitution et du changement climatique ainsi qu'à évaluer le risque de dégâts biotiques et abiotiques pourraient améliorer et compléter ces résultats.

6. Bibliographie³⁰

- Alderweireld, M., Burnay, F., Pitchugin, M., & Lecomte, H. (2015). *Inventaire Forestier Wallon. Résultats 1994 – 2012*. SPW, DGO3, DNF, Direction des Ressources forestières.
- Baul, T. K., Alam, A., Strandman, H., Seppälä, J., Peltola, H., & Kilpeläinen, A. (2020). Radiative forcing of forest biomass production and use under different thinning regimes and initial age structures of a Norway spruce forest landscape. *Canadian Journal of Forest Research*, 50(6), 523-532. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2019-0286>
- Brunet-Navarro, P., Jochheim, H., & Muys, B. (2016). Modelling carbon stocks and fluxes in the wood product sector: A comparative review. *Global Change Biology*, 22(7), 2555-2569. <https://doi.org/10.1111/gcb.13235>
- Chen, J., Colombo, S. J., Ter-Mikaelian, M. T., & Heath, L. S. (2008). Future carbon storage in harvested wood products from Ontario's Crown forests. *Canadian Journal of Forest Research*, 38(7), 1947-1958. <https://doi.org/10.1139/X08-046>
- Cláudia Dias, A., Louro, M., Arroja, L., & Capela, I. (2009). Comparison of methods for estimating carbon in harvested wood products. *Biomass and Bioenergy*, 33(2), 213-222. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2008.07.004>
- Defays, V., & Saerens, A. (2021). *Le secteur du sciage. État du secteur du sciage en Belgique en 2020*. Hout Info Bois.
- Dufour-Kowalski, S., Courbaud, B., Dreyfus, P., Meredieu, C., & De Coligny, F. (2012). Capsis : An open software framework and community for forest growth modelling. *Annals of Forest Science*, 69(2), 221-233. <https://doi.org/10.1007/s13595-011-0140-9>
- FCBA. (2022). *Memento 2022*. Institut Technologique FCBA. <https://www.fcba.fr/wp-content/uploads/2023/01/Memento-2022-WEB.pdf>
- Fehrenbach, H., Bischoff, M., Böttcher, H., Reise, J., & Hennenberg, K. J. (2022). The Missing Limb : Including Impacts of Biomass Extraction on Forest Carbon Stocks in Greenhouse Gas Balances of Wood Use. *Forests*, 13(3), 365. <https://doi.org/10.3390/f13030365>
- FNEF. (2023). *Prix moyens des bois sur pieds (prix m³ en euros), printemps 2023*. Fédération Nationale des Experts Forestiers ASBL. <https://www.experts-forestiers.be/Tableauprixbois.pdf>
- Fortin, M., Ningre, F., Robert, N., & Mothe, F. (2012). Quantifying the impact of forest management on the carbon balance of the forest-wood product chain : A case study applied to even-aged oak stands in France. *Forest Ecology and Management*, 279, 176-188. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.05.031>
- Geng, A., Yang, H., Chen, J., & Hong, Y. (2017). Review of carbon storage function of harvested wood products and the potential of wood substitution in greenhouse gas mitigation. *Forest Policy and Economics*, 85, 192-200. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2017.08.007>

³⁰ Certaines sources reprises dans cette bibliographie n'ont été citées que dans les annexes (voir section 7).

- Hiltunen, M., Strandman, H., & Kilpeläinen, A. (2021). Optimizing forest management for climate impact and economic profitability under alternative initial stand age structures. *Biomass and Bioenergy*, 147, 106027. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2021.106027>
- Howard, C., Dymond, C. C., Griess, V. C., Tolken-Spurr, D., & Van Kooten, G. C. (2021). Wood product carbon substitution benefits : A critical review of assumptions. *Carbon Balance and Management*, 16(1), 9. <https://doi.org/10.1186/s13021-021-00171-w>
- IPCC. (2006). *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme.*
- IPCC. (2007). *Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.*
- IPCC. (2013). *Summary for Policymakers.* In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.*
- IPCC. (2019). *2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories.*
- IPCC. (2022). *Climate Change 2022 : Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.*
- Jasinevičius, G., Lindner, M., Cienciala, E., & Tykkyläinen, M. (2018). Carbon Accounting in Harvested Wood Products : Assessment Using Material Flow Analysis Resulting in Larger Pools Compared to the IPCC Default Method: Carbon Accounting in Harvested Wood Products. *Journal of Industrial Ecology*, 22(1), 121-131. <https://doi.org/10.1111/jiec.12538>
- Keith, H., Lindenmayer, D., Mackey, B., Blair, D., Carter, L., McBurney, L., Okada, S., & Konishi-Nagano, T. (2014). Managing temperate forests for carbon storage : Impacts of logging versus forest protection on carbon stocks. *Ecosphere*, 5(6), art75. <https://doi.org/10.1890/ES14-00051.1>
- Király, É., Börcsök, Z., Kocsis, Z., Németh, G., Polgár, A., & Borovics, A. (2022). Carbon Sequestration in Harvested Wood Products in Hungary an Estimation Based on the IPCC 2019 Refinement. *Forests*, 13(11), 1809. <https://doi.org/10.3390/f13111809>
- Klein, D., Höllerl, S., Blaschke, M., & Schulz, C. (2013). The Contribution of Managed and Unmanaged Forests to Climate Change Mitigation—A Model Approach at Stand Level for the Main Tree Species in Bavaria. *Forests*, 4(1), 43-69. <https://doi.org/10.3390/f4010043>
- Latte, N., Perin, J., Lejeune, P., & Claessens, H. (2022). *Le point sur l'équilibre feuillus/résineux et son évolution en forêt wallonne.* *Forêt.Nature* (165), 30-39.
- Ligot, G., Gheysen, T., Perin, J., Candaele, R., De Coligny, F., Licoppe, A., & Lejeune, P. (2023). From the simulation of forest plantation dynamics to the quantification of bark-stripping damage by ungulates. *European Journal of Forest Research*, 142(4), 899-916. <https://doi.org/10.1007/s10342-023-01565-w>
- Lippke, B., Oneil, E., Harrison, R., Skog, K., Gustavsson, L., & Sathre, R. (2011). Life cycle impacts of forest management and wood utilization on carbon mitigation : Knowns and unknowns. *Carbon Management*, 2(3), 303-333. <https://doi.org/10.4155/cmt.11.24>

- Liski, J., Pussinen, A., Pingoud, K., Mäkipää, R., & Karjalainen, T. (2001). Which rotation length is favourable to carbon sequestration? *Canadian Journal of Forest Research*, 31(11), 2004-2013. <https://doi.org/10.1139/x01-140>
- Luyssaert, S., Marie, G., Valade, A., Chen, Y.-Y., Njakou Djomo, S., Ryder, J., Otto, J., Naudts, K., Lansø, A. S., Ghattas, J., & McGrath, M. J. (2018). Trade-offs in using European forests to meet climate objectives. *Nature*, 562(7726), 259-262. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0577-1>
- Martes, L., & Köhl, M. (2022). Improving the Contribution of Forests to Carbon Neutrality under Different Policies—A Case Study from the Hamburg Metropolitan Area. *Sustainability*, 14(4), 2088. <https://doi.org/10.3390/su14042088>
- Mishra, A., Humpenöder, F., Churkina, G., Reyer, C. P. O., Beier, F., Bodirsky, B. L., Schellnhuber, H. J., Lotze-Campen, H., & Popp, A. (2022). Land use change and carbon emissions of a transformation to timber cities. *Nature Communications*, 13(1), 4889. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-32244-w>
- OEWB. (2015). *PanoraBois Wallonie*. Office Economique Wallon du Bois.
- OEWB. (2021). *PanoraBois Wallonie*. Office Economique Wallon du Bois.
- Pajot, G. (2011). Rewarding carbon sequestration in South-Western French forests : A costly operation? *Journal of Forest Economics*, 17(4), 363-377. <https://doi.org/10.1016/j.jfe.2010.12.002>
- Perin, J., Hébert, J., & Lejeune, P. (2016). *Nouvelles normes sylvicoles pour les peuplements purs équiennes d'épicéa et de douglas*. Gembloux Agro-Bio Tech.
- Pichancourt, J.-B., Manso, R., Ningre, F., & Fortin, M. (2018). A carbon accounting tool for complex and uncertain greenhouse gas emission life cycles. *Environmental Modelling & Software*, 107, 158-174. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.06.005>
- Richard, A., Zeller, V., Degrez, M., Thyssen, N., & De Boever, L. (2015a). *Life Cycle Assessment of Glued Laminated Timber LCA at product level*. Enecobois.
- Richard, A., Zeller, V., Degrez, M., Thyssen, N., & De Boever, L. (2015b). *Life Cycle Assessment of Sawn wood LCA at Product Level*. Enecobois.
- Sathre, R., & O'Connor, J. (2010). Meta-analysis of greenhouse gas displacement factors of wood product substitution. *Environmental Science & Policy*, 13(2), 104-114. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2009.12.005>
- Schulze, E. D., Bouriaud, O., Irslinger, R., & Valentini, R. (2022). The role of wood harvest from sustainably managed forests in the carbon cycle. *Annals of Forest Science*, 79(1), 17. <https://doi.org/10.1186/s13595-022-01127-x>
- Schulze, E. D., Sierra, C. A., Egenolf, V., Woerdehoff, R., Irslinger, R., Baldamus, C., Stupak, I., & Spellmann, H. (2020). The climate change mitigation effect of bioenergy from sustainably managed forests in Central Europe. *GCB Bioenergy*, 12(3), 186-197. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12672>
- SPW. (2023). *Tout savoir sur les pellets*. SPW Energie. <https://energie.wallonie.be/fr/tout-savoir-sur-les-pellets.html?IDC=9640&IDD=165917>

- SYPAL. (2012). *La palette bois affiche son profil environnemental*. Syndicat de l'industrie et des services de la palette (SYPAL).
- Thyssen, N., De Boever, L., Zeller, V., Richard, A., & Degrez, M. (2014). *Wood Flow Analysis of the Walloon Region* [ENECOBOIS project report]. CTIB-ULB.
- UNFCCC. (2015). *Report of the Conference of the Parties on its twenty-first session, held in Paris from 30 November to 13 December 2015*. <https://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/10a01.pdf>
- Vallet, P., Meredieu, C., Seynave, I., Bélouard, T., & Dhôte, J.-F. (2009). Species substitution for carbon storage : Sessile oak versus Corsican pine in France as a case study. *Forest Ecology and Management*, 257(4), 1314-1323. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2008.11.034>
- Verkerk, P. J., Delacote, P., Hurmekoski, E., Kunttu, J., Matthews, R., Mäkipää, R., Mosley, F., Perugini, L., Reyser, C. P. O., Roe, S., Trømborg, E., European Forest Institute, & Colling, R. (2022). *Forest-based climate change mitigation and adaptation in Europe (From Science to Policy)* [From Science to Policy]. European Forest Institute. <https://doi.org/10.36333/fs14>
- Wohlfrom, P. (2022). *Les produits bois et leur potentiel de stockage de carbone : Une solution dans l'atténuation du changement climatique ? Etude des résineux issus de la filière bois wallonne*. Université Libre de Bruxelles.
- Zeller, V., Richard, A., Degrez, M., Thyssen, N., & De Boever, L. (2015). *Life Cycle Assessment of Medium Density Fibreboard*. Enecobois.
- Zhang, L., Sun, Y., Song, T., & Xu, J. (2019). Harvested Wood Products as a Carbon Sink in China, 1900–2016. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(3), 445. <https://doi.org/10.3390/ijerph16030445>

7. Annexes

7.1. Annexe 1 : Informations supplémentaires sur le logiciel CAT³¹

- Biomasse vivante

Par défaut, CAT convertit les arbres vivants en carbone selon la méthode Tier 1 et l'équation :

$$\hat{c}_{tsi} = v_{tsi} \cdot mv_s \cdot feb_{a,s} \cdot feb_{s,s} \cdot fc_s \quad (1)$$

Où :

- \hat{c}_{tsi} est le contenu en carbone estimé de l'arbre i , de l'espèce s à l'instant t [tC]
- v_{tsi} est le volume de ce même arbre [m^3]
- mv_s est la masse volumique anhydre de l'espèce s [t/m^3]
- $feb_{a,s}$ est le facteur d'expansion de la biomasse aérienne de l'espèce s
- $feb_{s,s}$ est le facteur d'expansion de la biomasse souterraine de l'espèce s
- fc_s est la fraction de carbone de l'espèce s

Pour séparer la biomasse vivante en deux compartiments (souterraine et aérienne), les équations suivantes sont utilisées :

- Pour la biomasse aérienne : $\hat{c}_{a,tsi} = v_{tsi} \cdot mv_s \cdot feb_{a,s} \cdot fc_s \quad (2)$
- Pour la biomasse souterraine : $\hat{c}_{s,tsi} = v_{tsi} \cdot mv_s \cdot feb_{a,s} \cdot (1 - feb_{s,s}) \cdot fc_s \quad (3)$

Où $\hat{c}_{a,tsi}$ et $\hat{c}_{s,tsi}$ sont le contenu en carbone estimé de l'arbre i , de l'espèce s à l'instant t dans la biomasse aérienne et dans la biomasse souterraine respectivement.

En additionnant les différentes valeurs pour chaque arbre, le logiciel peut fournir, à chaque instant, la quantité de carbone totale contenue dans la biomasse vivante.

- Matière organique morte

Lorsque de la matière organique rentre dans le réservoir « matière organique morte », l'équation (1) est utilisée pour convertir les volumes en quantités de carbone. La matière organique morte contient deux compartiments : la litière et le bois mort. Dans ces deux compartiments, le stock de carbone évolue selon une décroissance de premier ordre. Ainsi, CAT considère qu'au cours du temps, une proportion constante de carbone est éliminée. La formule est la suivante :

$$\Pr(T > t) = e^{-t/\lambda} \quad (4)$$

Où T est la durée de vie, t est l'année et λ est la durée de vie moyenne.

³¹ Sauf mention contraire, toutes les informations de cette partie sont issues de Pichancourt *et al.* (2018).

- **Produits bois**

Le stock de carbone dans les produits bois évolue aussi selon une décroissance de premier ordre (voir équation (4)). Pour les produits bois, comme une durée de vie particulière est associée à chaque catégorie de produit, la décroissance du stock de carbone est réalisée de manière indépendante pour chaque catégorie. Dans le cas où des produits bois sont envoyés en décharge à la fin de leur cycle de vie, la fraction décomposable (40 % selon Pichancourt *et al.*, 2018) est également soumise à une décroissance de premier ordre. Pour la durée de vie, le GIEC préconise d'utiliser 33 ans pour les pays dont le climat est tempéré et humide (IPCC, 2006). A cause des conditions anaérobiques, tout le carbone décomposable n'est pas relargué sous forme de CO₂. Le logiciel CAT considère par défaut que 25% du carbone décomposable est émis sous forme de méthane (Pichancourt *et al.*, 2018).

- **Flux**

En plus des stocks de carbone, il est possible d'obtenir, avec le logiciel CAT, une estimation :

- De l'accumulation du carbone non dégradable en décharge ;
- Des émissions de CH₄ liées à la digestion anaérobie des produits bois en décharge ;
- De l'effet de substitution (matérielle et énergétique) ;
- Des émissions de CO₂ associées au cycle de vie des produits bois.

7.2. Annexe 2 : Les 22 espèces ou catégories d'espèces du modèle Walsi

Tableau A1 : Les 22 espèces ou catégories d'espèces que le modèle Walsi peut traiter. Tableau repris de (V. Van Keymeulen, communication personnelle, 2023).

<i>Quercus sp.</i>	<i>Picea abies</i>	<i>Carpinus betulus</i>
<i>Fagus sylvatica</i>	<i>Pseudotsuga menziesii</i>	<i>Alnus sp.</i>
<i>Betula sp.</i>	<i>Pinus sylvestris</i>	<i>Quercus rubra</i>
<i>Fraxinus excelsior</i>	<i>Sorbus aucuparia</i>	<i>Prunus avium</i>
<i>Populus x (hybridé)</i>	<i>Robinia pseudoacacia</i>	<i>Castanea sativa</i>
<i>Acer pseudoplatanus</i>	<i>Prunus serotina</i>	<i>Picea sitchensis</i>
<i>Larix sp</i>	<i>Pinus nigra</i>	Other hardwood
Other softwood		

Les catégories "Other hardwood" et "Other softwood" regroupent respectivement toutes les essences feuillues et résineuses qui ne sont pas reprises dans une des autres catégories.

7.3. Annexe 3 : Table de production utilisée pour les pessières pures équiennes

Cette table de production est issue de Perin *et al.*, 2016.

Classe de productivité 2, plantation 2.5 x 2 m

Caractéristiques : Essence : épicéa commun Plantation : 2.5 x 2 (90% de reprise) Rotation : 6 ans
 Classe II (27 m à 50 ans) Cloisonnement : 1 ligne sur 9 Taux d'actualisation : 2 %

Table de production

Age années	Hdom m	Avant prélèvement				Prélèvement				Après prélèvement				Accroissements						h/d	Ecl %	Dist m
		Nha N/ha	Cg cm	Gha m ² /ha	Vha m ³ /ha	Nha N/ha	Cg cm	Gha m ² /ha	Vha m ³ /ha	Nha N/ha	Cg cm	Gha m ² /ha	Vha m ³ /ha	ACC cm/ha/an	ACG m ² /ha/an	AMG m ³ /ha/an	ACV m ³ /ha/an	AMV m ³ /ha/an	PTV m ³ /ha			
22	13.5	1708	46	28.3	172	557	42	8.0	47	1150	47	20.3	125	2.0	1.88	1.28	19.9	7.8	172	90	32.6	3.2
28	17.0	1147	59	31.5	244	340	50	6.7	49	807	62	24.9	196	1.9	1.65	1.41	20.4	10.4	291	86	29.7	3.8
34	20.1	805	74	34.8	318	182	64	5.9	52	623	76	28.9	266	1.8	1.47	1.45	20.2	12.2	414	83	22.7	4.3
40	22.9	621	87	37.7	387	127	77	6.0	60	494	90	31.7	327	1.8	1.32	1.46	19.4	13.4	535	80	20.4	4.8
46	25.3	493	101	39.7	444	98	90	6.4	71	395	103	33.3	373	1.8	1.19	1.44	18.3	14.2	652	77	19.9	5.4
52	27.4	394	114	40.4	483	67	104	5.8	69	327	115	34.7	414	1.7	1.08	1.41	17.3	14.6	762	75	17.1	5.9
58	29.3	326	126	41.2	518	49	116	5.3	66	277	128	35.9	452	1.7	1.00	1.38	16.4	14.9	865	72	15.1	6.5
64	30.9	276	138	41.9	550	38	128	4.9	64	239	140	37.0	486	1.7	0.94	1.34	15.7	15.1	964	70	13.6	7.0
70	32.4	239	150	42.7	580	29	141	4.6	63	210	151	38.1	517	1.7	0.89	1.31	15.0	15.1	1 058	67	12.2	7.4
76	33.7	210	161	43.4	607	23	153	4.3	61	186	162	39.0	546	1.7	0.84	1.27	14.4	15.1	1 148	65	11.2	7.9
82	34.9	186	172	44.1	632	20	162	4.1	59	167	174	40.0	573	1.7	0.80	1.24	13.9	15.0	1 234	63	10.5	8.3
88	36.0	167	184	44.8	656	167	184	44.8	656	-	-	-	-	-	-	1.21	-	15.0	1 318	61	-	-

Distribution des volumes produits par classe de grosseur

Age années	Hdom m	Classes de grosseur - Volume sur pied								VMV		Classes de grosseur - Volume prélevés								VMP		VMA totale €/ha
		20-40 m ³ /ha	40-60 m ³ /ha	60-70 m ³ /ha	70-90 m ³ /ha	90-120 m ³ /ha	120-150 m ³ /ha	150-180 m ³ /ha	180+ m ³ /ha	€/ha	€/ha	20-40 m ³ /ha	40-60 m ³ /ha	60-70 m ³ /ha	70-90 m ³ /ha	90-120 m ³ /ha	120-150 m ³ /ha	150-180 m ³ /ha	180+ m ³ /ha	€/ha	€/ha	
22	13.5	33	114	25	0	0	0	0	5 199	3 363	13	28	6	0	0	0	0	0	951	615	3 363	
28	17.0	7	101	74	62	0	0	0	9 711	5 578	5	29	8	6	0	0	0	0	1 267	728	6 193	
34	20.1	0	31	76	174	37	0	0	15 550	7 931	0	19	17	13	3	0	0	0	1 882	960	9 274	
40	22.9	0	3	21	195	169	0	0	21 853	9 897	0	2	13	33	11	0	0	0	2 715	1 229	12 200	
46	25.3	0	0	1	85	337	21	0	27 833	11 193	0	0	1	40	28	1	0	0	3 735	1 502	14 725	
52	27.4	0	0	0	6	344	133	0	32 805	11 715	0	0	0	5	57	6	0	0	4 077	1 456	16 749	
58	29.3	0	0	0	0	193	325	0	37 233	11 806	0	0	0	0	51	16	0	0	4 250	1 348	18 296	
64	30.9	0	0	0	0	28	453	69	41 098	11 572	0	0	0	0	17	45	2	0	4 325	1 218	19 409	
70	32.4	0	0	0	0	0	351	229	44 382	11 097	0	0	0	0	0	53	10	0	4 379	1 095	20 152	
76	33.7	0	0	0	0	0	139	462	46 982	10 431	0	0	0	0	0	42	19	0	4 310	957	20 581	
82	34.9	0	0	0	0	0	6	506	48 987	9 658	0	0	0	0	0	3	51	4	4 175	823	20 765	
88	36.0	0	0	0	0	0	0	338	50 451	8 832	0	0	0	0	0	0	338	318	50 451	8 832	20 762	
Total	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	19	78	44	97	167	166	421	322	-	20 762	-	

Légende des tables de production

Variables	Description
Age	Age depuis la plantation (on considère que les plants sont âgé de 4 ans lors de la plantation)
Hdom	Hauteur dominante (moyenne des hauteurs des 100 plus gros arbres à l'hectare) en m
Nha	Nombre de tige par hectare
Cg	Circonférence à hauteur de poitrine de l'arbre de surface terrière moyenne en cm
Gha	Surface terrière totale par hectare (m ² /ha)
Vha	Volume sur pied total par hectare à la recoupe 22 cm (m ³ /ha)
ACC	Accroissement courant en circonférence à hauteur de poitrine (cm/an)
ACG	Accroissement courant en surface terrière (m ² /ha/an)
AMG	Accroissement moyen en surface terrière depuis la plantation (m ² /ha/an)
ACV	Accroissement courant en volume (m ³ /ha/an)
AMV	Accroissement moyen en volume depuis la plantation (m ³ /ha/an)
PTV	Production totale en volume depuis la plantation (m ³ /ha)
h/d	Coefficient de stabilité des peuplements: hauteur dominante divisée par le diamètre moyen
% Ecl	Pourcentage du nombre de tige sur pied prélevé lors de l'éclaircie
Dist	Distance moyenne en mètre entre les arbres après l'éclaircie
VMV*	Valeur marchande du volume sur pied (€/ha) estimée sur base des prix de ventes observés entre 2012 et 2014
VMP*	Valeur marchande des prélèvements (€/ha) estimée sur base des prix de ventes observés entre 2012 et 2014
VMA*	Valeur marchande estimée actualisée à l'année de la plantation (taux d'actualisation de 2%) en €/ha
VMA Totale*	Somme des VMA des prélèvements précédents et du volume sur pied de l'année en cours (€/ha)

*Les chiffres présentés représentent une estimation moyenne et n'engagent en rien les auteurs de ces outils

7.4. Annexe 4 : Informations supplémentaires sur la hêtraie jardinée

Tableau A2 : Nombre d'arbres par hectare (NHA) en début de simulation et en fin de simulation (avant et après éclaircie) par espèce ou par catégorie d'espèces Walsi.

	<i>Quercus sp.</i>	<i>Fagus sylvatica</i>	<i>Picea abies</i>	<i>Other softwood</i>	<i>Other hardwood</i>
NHA initial	2	207	14	3	3
NHA final avant éclaircie	2	243	20	3	3
NHA final après éclaircie	1	219	19	2	3

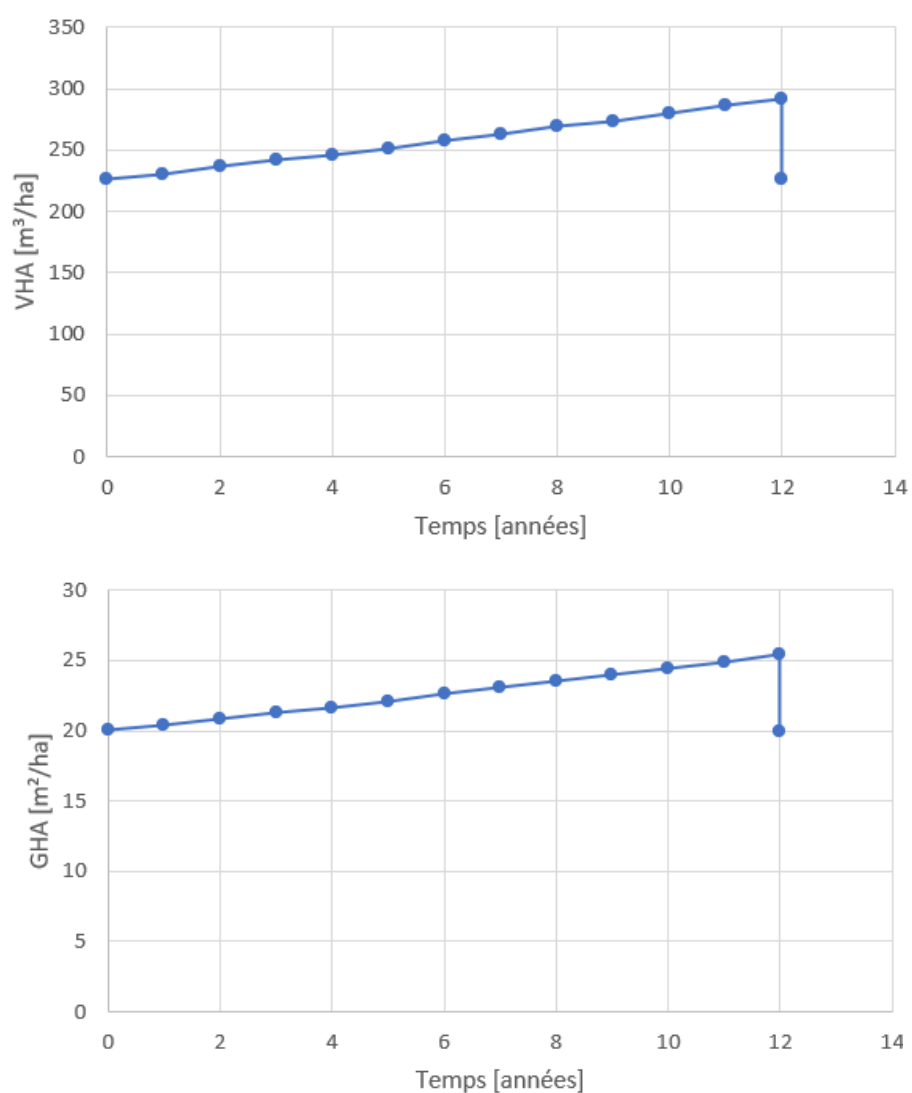


Figure A1 : Evolution du volume par hectare (VHA) et de la surface terrière par hectare (GHA) sur une rotation (12 ans) pour la futaie jardinée feuillue simulée.

7.5. Annexe 5 : Informations supplémentaires sur la simulation des pessières

Comme mentionné au point 2.3.3, les 10 pessières ont été obtenues à partir de la même simulation, faite en accord avec la table de production de l'Annexe 3, qui correspond à la situation E88. Pour les peuplements E57, E70 et E82, les éclaircies à respectivement 57, 70 et 82 ans ont été remplacées par une mise à blanc³².

Pour le peuplement E100, la mise à blanc à 88 ans a été remplacée par une éclaircie par le haut visant à diminuer la surface terrière de 4 m²/ha. Ensuite, une évolution de 6 ans a été simulée, à nouveau suivie d'une éclaircie par le haut de 4m²/ha, d'une autre évolution de 6 ans et d'une mise à blanc.

Pour les cinq peuplements sans éclaircies, des évolutions de 58, 70, 82, 88 et 100 ans ont été simulées à partir des données d'initialisation du peuplement E88. Pour ces cinq peuplements, l'évolution du VHA jusqu'à la mise à blanc est visible sur la figure A2.

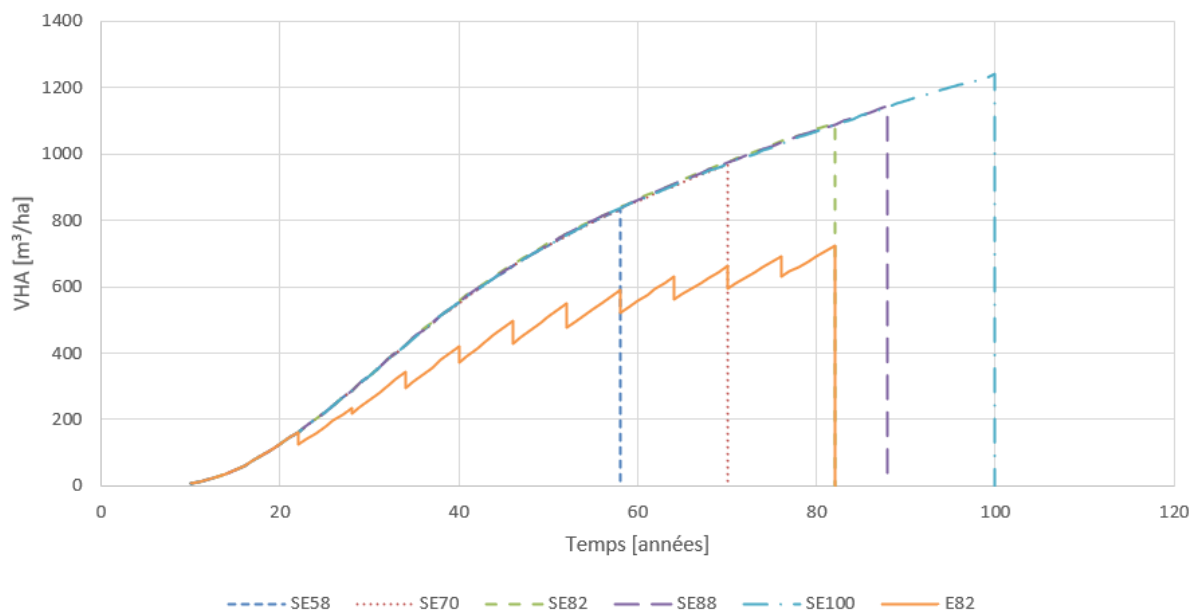


Figure A2 : Evolution du volume par hectare (VHA) jusqu'à la mise à blanc pour les cinq peuplements gérés sans éclaircies (SE) et pour le peuplement de référence (E82).

³² Le peuplement avec éclaircies et une longueur de révolution de 82 ans (E82) est identique à la pessière décrite à la section 2.3.2.

7.6. Annexe 6 : Informations supplémentaires sur les valeurs du tableau 5

Dans un souci de transparence et pour faciliter une éventuelle réutilisation des données, un commentaire est associé aux valeurs lorsque celles-ci ne sont pas mentionnées telles quelles dans les sources citées.

- Emissions liées à la récolte, au transport et à la transformation du bois

Tableau A3 : Sources des émissions de CO₂ liées à la récolte, au transport jusqu'à l'usine et à la transformation du bois du tableau 5. Les catégories de produits en gras sont celles utilisées dans cette étude. Les valeurs en gras sont celles qui doivent être renseignées dans le logiciel CAT.

Catégorie de produits	Unité fonctionnelle - UF [m ³]	Unité fonctionnelle - UF [kg]	Emissions [kg CO ₂ eq / UF]	Sources
Bois scié moyen (1)	1	383	27,8	Richard <i>et al.</i> , 2015b
Bois lamellé-collé (2)	1	446	119,0	Richard <i>et al.</i> , 2015a ; Wohlfrom, 2022
Construction (3)	1	394	44,2	OEWB, 2021
Emballage, coffrage et transport (4)	/	21	1,2	SYPAL, 2012 ; https://www.epal-pallets.org/eu-fr/ ; https://www.glfbois.fr/
Menuiserie (5)	1	383	32,6	Hypothèse à partir de Richard <i>et al.</i> , 2015b
Piquets, poteaux, tuteurs (6)	1	383	27,8	
Traverses de chemin de fer (7)	1	615	27,8	
MDF (8)	1	543	158,1	Unilin, communication personnelle, 2023
Papier (9)	/	1 000	440,0	http://www.cobelpa.be/fr/cobelpa.html
Pellets (10)	/	1 000	150,0	SPW, 2023
Bois énergie (11)	/	1 000	70,0	Fehrenbach <i>et al.</i> , 2022
Panneaux de particules (12)	1	548	140,7	Unilin, communication personnelle, 2023

(1) Le produit bois scié moyen est un modèle qui tient compte du fait que certains produits sciés peuvent être séchés, rabotés, traités et emballés. Compte tenu des différences importantes dans les volumes sciés en résineux et en feuillus, la masse sèche pour 1 m³ de ce produit bois scié moyen a été déterminée en faisant une moyenne pondérée des masses volumiques anhydres de l'épicéa, du douglas et du mélèze. Les données nécessaires à ce calcul se trouvent dans le Panorabois Edition 2021, page 83 (OEWB, 2021) et sur le site HoutInfoBois (<https://www.houtinfobois.be/>).

(2) Pour le bois lamellé-collé, les émissions de CO₂ déterminées par Richard *et al.* (2015a) ont été modifiées par Wohlfrom (2022) afin de tenir compte du fait que, en accord avec l'approche production, tout le bois vient de Wallonie. Un mètre cube de bois lamellé-collé correspond à 446 kg de bois sec.

(3) Les valeurs pour le bois d'œuvre de construction ont été obtenues par moyenne pondérée des valeurs pour le bois scié moyen et pour le bois lamellé-collé, sur base des pourcentages de la page 83 du Panorabois édition 2021 (OEWB, 2021).

- (4) L'unité fonctionnelle retenue correspond à une palette qui, sur base des sources citées, pèse environ 25 kg, avec une teneur en eau de 18%. La masse anhydre correspondant à une UF est donc de 21 kg. La valeur donnée pour les émissions est issue de SYPAL (2012).
- (5) La valeur mentionnée pour les émissions de CO₂ est issue de Richard *et al.* (2015b) en considérant que les émissions liées à la production de 1 m³ de produit de menuiserie en bois massif sont les mêmes que pour la production de 1 m³ de bois de sciage séché et raboté. Pour la masse correspondant à cette UF, voir point 1.
- (6) Les piquets, poteaux et tuteurs ont été considérés comme des bois sciés moyens.
- (7) Les traverses de chemin de fer rentrent dans la définition du bois scié moyen. Toutefois, dans ce cas-ci, la masse correspondant à une UF est la masse volumique anhydre du chêne, obtenue à partir de la valeur donnée sur HoutInfoBois (<https://www.houtinfo Bois.be/>).
- (8) Les valeurs proviennent de la Déclaration Environnementale de Produit (DEP) pour le MDF réalisée par Unilin.
- (9) Selon la source citée, 440 kg de CO₂ sont émis pour produire 1t de papier. Or, comme 2t de bois sec sont nécessaires à la production de 1 t de pâte et que 1 t de pâte permet la production de 2t de papier, la masse de bois sec correspondant à cette UF est de 1000 kg.
- (10) Les valeurs pour les pellets peuvent être directement obtenues à partir de la source citée en considérant que le pouvoir calorifique des pellets est de 5kWh/kg.
- (11) Les émissions de CO₂ liées à la récolte et au transport d'une tonne sèche de bois énergie peuvent être directement obtenues à partir de la source citée.
- (12) Les valeurs proviennent de la DEP pour les panneaux de particules réalisée par Unilin.

- Durées de vie

Le tableau A4 reprend, pour chaque catégorie de produits, la durée de vie moyenne estimée. Pour la catégorie « menuiserie », un commentaire est associé car la valeur n'est pas mentionnée telle quelle dans les sources citées.

Tableau A4 : Sources des durées de vie moyennes du tableau 5. Les valeurs en gras sont celles qui doivent être renseignées dans le logiciel CAT.

Catégorie de produits	Durée de vie moyenne [années]	Sources
Construction	60	H. Frère, communication personnelle, 2023
Emballage, coffrage et transport	6,3	Pichancourt et al. (2018) ; Fortin et al. (2012)
Menuiserie (1)	15	Pichancourt et al. (2018) ; Fortin et al. (2012)
Piquets, poteaux, tuteurs	15	Wohlfrom, 2022
Traverses de chemin de fer	20	Hypothèse
MDF	20	E. Letombe, communication personnelle, 2023
Papier	2,8	Pichancourt et al. (2018) ; Fortin et al. (2012)
Bois énergie	1,7	Pichancourt et al. (2018) ; Fortin et al. (2012)
Panneaux de particules	20	E. Letombe, communication personnelle, 2023

- (1) La moyenne des durées de vie pour les 5 débouchés des « *furniture products* » de Pichancourt et al. (2018) est de 16,2 années. Cette valeur a été arrondie à 15, pour être en cohérence avec les estimations d'experts, qui sont des multiples de cinq pour les produits dont la durée de vie dépasse 10 ans.

- Facteurs de substitution

Le tableau A5 et les commentaires associés permettent de comprendre comment les facteurs de substitution du tableau 5 ont été obtenus. Les facteurs de déplacement (DF) sont également indiqués dans ce tableau, car pour les catégories « piquets, poteaux, tuteurs » et « traverses de chemin de fer », les facteurs de substitution ont été obtenus à partir des DF. En accord avec la définition donnée au point 1.2.1., les DF peuvent être aisément obtenus à partir des facteurs de substitution et de l'UF associée, selon la formule ci-dessous :

$$DF = \frac{SF \cdot \frac{12}{44}}{\frac{UF}{2}} \quad (5)$$

NB : cette formule est adaptée aux unités utilisées dans le tableau A5.

Tableau A5 : Informations supplémentaires sur les facteurs de substitution du tableau 5. Les valeurs en gras sont celles qui doivent être renseignées dans le logiciel CAT.

Catégorie de produits	Unité fonctionnelle [kg]	Facteur de substitution [kg CO _{2eq} / UF]	Facteur de déplacement [tC/tC]	Sources
Construction (1)	394	980	1,36	Pichancourt <i>et al.</i> , 2018
Emballage, coffrage et transport (2)	21	23	0,60	
Menuiserie (3)	383	367	0,52	
Piquets, poteaux, tuteurs (4)	383	421	0,60	Sathre & O'Connor, 2010
Traverses de chemin de fer (5)	615	677	0,60	Sathre & O'Connor, 2010
MDF (6)	543	718	0,72	Thyssen <i>et al.</i> , 2014 ; Pichancourt <i>et al.</i> , 2018
Papier (7)	1000	/	/	Fortin <i>et al.</i> , 2012
Panneaux de particules (8)	548	711	0,71	Pichancourt <i>et al.</i> , 2018 (hypothèse)
Bois énergie : cogénération (9)	1000	610	0,33	OEWB, 2021 ; Pichancourt <i>et al.</i> , 2018
Bois énergie : chauffage industriel (10)	1000	620	0,34	
Bois énergie : chauffage collectivités (11)	1000	630	0,34	
Bois énergie : chauffage résidentiel (12)	1000	680	0,37	

- (1) Le SF a été obtenu en adaptant la valeur donnée par Pichancourt *et al.* (2018) pour la catégorie « *truss and flooring* » à une UF de 394 kg et à une durée de vie de 60 ans (en accord avec le tableau A4).
- (2) Le SF a été obtenu en adaptant le SF pour la catégorie « *heavy packages* » de Pichancourt *et al.* (2018) à une UF de 21 kg.
- (3) Le SF a été obtenu en adaptant le SF pour la catégorie générale « *furniture products* » de Pichancourt *et al.* (2018) à une UF de 383 kg.
- (4) Le SF correspond à un DF de 0,6, qui est la valeur basse des DF pour cette catégorie dans la méta-analyse de Sathre & O'Connor (2010).
- (5) Par hypothèse, le DF pour les traverses de chemin de fer est le même que pour les piquets, poteaux et tuteurs. Ainsi, le SF pour les traverses de chemin de fer est également obtenu à partir d'un DF de 0,6.

- (6) En accord avec Thyssen *et al.* (2014), il peut être considéré que les panneaux de MDF se répartissent de manière équitable dans les catégories « *truss and flooring* » et « *office, kitchen and home furniture* » de Pichancourt *et al.* (2018). Ainsi, le SF a été obtenu sur base des SF de ces deux catégories, en les adaptant à une UF de 553 kg.
- (7) En accord avec Fortin *et al.* (2012), il n’y a pas de facteur de substitution pour le papier, car il n’existe pas de produit alternatif remplissant les mêmes fonctions.
- (8) En considérant que les panneaux de particules suivent la même répartition que les panneaux MDF, le SF a été obtenu conformément au point 6, en adaptant les valeurs à une UF de 543 kg.
- (9) Le SF a été obtenu sur base des valeurs pour la catégorie « *Energy wood* » de Pichancourt *et al.* (2018) (moyenne pondérée en fonctions des quantités de la page 103 du panorabois, en considérant que, mis à part le pellet, tout est du « *firewood* »). La valeur obtenue a ensuite été adaptée pour correspondre à une UF de 1000 kg.
- (10) Voir (9).
- (11) Le SF a été obtenu sur base des valeurs pour la catégorie « *Energy wood* » de Pichancourt *et al.* (2018) (moyenne pondérée en fonctions des quantités des tableaux de l’annexe 7 pour la cogénération, en considérant que, mis à part le pellet, tout est du « *firewood* »). La valeur obtenue a ensuite été adaptée pour correspondre à une UF de 1000 kg.
- (12) Voir (9).

7.7. Annexe 7 : Informations supplémentaires sur les valeurs de la figure 5

Les valeurs utilisées pour la réalisation du schéma de la figure 5 sont présentées dans les tableaux A6, A7, A8 et A9. Seule la colonne avec les pourcentages est importante pour le logiciel CAT. Les quantités ne sont données qu'à titre indicatif³³, lorsqu'elles ont été utilisées pour établir les pourcentages. Dans le cas où des professionnels de la filière forêt-bois ont été contactés, seuls les pourcentages sont indiqués.

Dans un souci de transparence et pour faciliter une éventuelle réutilisation de ces données, un commentaire est associé aux quantités lorsque celles-ci ne sont pas mentionnées telles quelles dans les sources citées.

- Récolte et rémanents forestiers

Tableau A6 : Informations supplémentaires sur les valeurs relatives à la récolte et aux rémanents forestiers du schéma de la figure 5. Les valeurs en gras sont celles qui doivent être renseignées dans le logiciel CAT.

	Catégorie	Destination	Quantité totale (m ³)	Quantité (m ³)	Quantité (t)	Flux (%)	Année	Sources
R é s i n e u x	Récolte	Bois d'œuvre	3 171 000	2 061 000	/	65	2014	OEWB, 2021 ; Thyssen <i>et al.</i> , 2014
		Chantiers de découpe		951 000	/	30		
		Bois industriel		127 000	/	4		
		Bois énergie		32 000	/	1		
	Branches fines	Litière (forêt)	560 000	560 000	/	100	2014	Thyssen <i>et al.</i> , 2014
		Bois énergie		0	/	0		
	Souches et racines	Bois mort (forêt)	/	/	/	100	2014	H. Claessens, communication personnelle, 2023 ; Thyssen <i>et al.</i> , 2014
		Bois énergie	/	/	/	0		
	Arbres morts et chablis	Bois mort (forêt)	/	/	/	100	/	G. Ligot, communication personnelle, 2023 (hypothèse pour l'étude)
		Bois énergie	/	/	/	0		
F e u i l l u s	Récolte	Bois d'œuvre	791 000	230 000	/	29	2014	OEWB, 2021 ; Thyssen <i>et al.</i> , 2014
		Bois industriel		133 000	/	17		
		Bois énergie		428 000	/	54		
	Branches fines	Litière (forêt)	151 000	57 000	/	38	2014	Thyssen <i>et al.</i> , 2014
		Bois énergie		94 000	/	62		
	Souches et racines	Bois mort (forêt)	/	/	/	100	2014	H. Claessens, communication personnelle, 2023 ; Thyssen <i>et al.</i> , 2014
		BE	/	/	/	0		
	Arbres morts et chablis	Bois mort (forêt)	/	/	/	100	/	G. Ligot, communication personnelle, 2023 (hypothèse pour l'étude)
		BE	/	/	/	0		

NB : les pourcentages pour la récolte doivent être adaptés dans CAT en fonction du modèle de billonnage (voir point 2.3., description des cas étudiés).

³³ Il n'y a d'ailleurs pas de cohérence parfaite entre toutes les quantités qui sont données dans les tableaux A6 à A9. En effet, les quantités sont issues de nombreuses sources et ont été calculées pour des années différentes et avec des méthodes différentes. Ceci n'est cependant pas problématique, car ces quantités ne servent qu'à établir des flux relatifs.

- **Bois d'œuvre, bois industriel, bois énergie et produits connexes**

Tableau A7 : Informations supplémentaires sur les valeurs relatives au bois d'œuvre, au bois industriel, au bois énergie et aux produits connexes du schéma de la figure 5. Le « R » signifie « Résineux », le « F » signifie « Feuillus » et « Mixte » indique que les feuillus et les résineux sont considérés ensemble. Les valeurs en gras sont celles qui doivent être renseignées dans le logiciel CAT.

	Catégorie	Destination	Quantité totale (m ³)	Quantité (m ³)	Quantité (t)	Flux (%)	Année	Sources
R	Chantiers de découpe	Bois d'œuvre	951 000	400 000	/	42	2014	Thyssen <i>et al.</i> , 2014
		Entreprises de travail du bois rond		333 000	/	35		
		Bois industriel		124 000	/	13		
		Produits connexes		95 000	/	10		
	Bois d'œuvre	Scieries - résineux	2 460 000	2 460 000	/	100	2014	Defays & Saerens, 2021 ; OEWB, 2021 ; Thyssen <i>et al.</i> , 2014
Bois industriel	Panneautiers Wallonie	/	/	/	50	/	E. Letombe, communication personnelle, 2023	
	Granulation	/	/	/	50			
Mixte	Bois énergie	Cogénération	/	/	156 000	20	2014	E. Bays, communication personnelle, 2015
		Chauffage industriel (1)		/	31 246	4	2013	OEWB, 2015
		Chauffage collectivités		/	6 100	1	2014	E. Bays, communication personnelle, 2015
		Chauffage résidentiel		/	582 000	75		
	Produits connexes	Panneautiers Wallonie (2)	/	/	262 000	20	2014	OEWB, 2021
		Industrie de la pâte à papier et du papier		/	26 000	2	2014	E. Meurisse, communication personnelle, 2022
		Granulation (3)		/	400 000	31	2014	M. Neirinck, communication personnelle, 2023 ; OEWB,
		Cogénération		/	507 000	40	2014	E. Bays, communication personnelle, 2015
		Chauffage industriel (4)		/	61 000	5	2013	OEWB, 2015
		Chauffage collectivités		/	6 100	1	2014	E. Bays, communication personnelle, 2015
Chauffage résidentiel	/	3 136	1					
F	Bois d'œuvre	Scieries - feuillus	/	/	/	100	/	Thyssen <i>et al.</i> , 2014
	Bois industriel	Industrie de la pâte à papier et du papier	/	/	/	100	/	E. Bays, communication personnelle, 2015 ; E. Letombe, communication personnelle, 2023

- (1) La valeur de 31 246 t a été obtenue sur base des données du Panorabois édition 2015 (OEWB, 2015) en considérant que le bois énergie est constitué du « bois bûche » et des « rémanents forestiers » (en prenant l'hypothèse que ceux-ci représentent 20% des « autres bois » (Wohlfrom, 2022)). Le calcul est donc le suivant : $32\,520 + 0,2 \times 93\,632 - 20\,000 = 31\,246$.
- (2) Cette valeur est celle pour la Belgique. Toutefois, en accord avec le développement du point 2.2.4, cette étude se base sur l'hypothèse que le devenir des bois exportés est le même que celui des bois transformés localement. Il est donc ici considéré, pour établir les flux, que ces 262 000 t vont vers les panneautiers de Wallonie.
- (3) En 2014, 450 000 t de pellets ont été produites en Wallonie. En accord avec les valeurs des tableaux A6 et A7, 125 000 m³ - soit 50 000 t sèches (OEWB, 2021) - de bois industriel résineux ont été utilisés pour la production de pellets. La quantité de produits connexes utilisée pour la production des pellets en 2014 peut donc être estimée à 400 000 t. Ceci est en accord avec M. Neirinck (communication personnelle, 2023) selon qui les pellets wallons sont essentiellement produits à partir de produits connexes.

(4) La valeur de 61 000 t a été obtenue sur base des données du Panorabois édition 2015 (OEWB, 2015) en posant l’hypothèse que les produits connexes représentent 65% des « autres bois » (Wohlfrom, 2022).

- **Transformation du bois :**

Tableau A8 : Informations supplémentaires sur les valeurs relatives à la transformation du bois dans le schéma de la figure 5. La catégorie « Mixte » indique que les feuillus et les résineux sont considérés ensemble. Les valeurs en gras sont celles qui doivent être renseignées dans le logiciel CAT. Dans la colonne « Destination », les caractères gras indiquent qu’il s’agit des catégories de produits du tableau 5.

	Catégorie	Destination	Quantité totale (m³)	Quantité (m³)	Flux (%)	Année	Sources
R é s i n e u x	Entreprises de travail du bois rond	Piquets, poteaux, tuteurs	/	/	77	/	Thyssen <i>et al.</i> , 2014
		Produits connexes		/	23		
	Scieries	Entreprises de construction	2 500 000	1 360 000	36	2020	Defays & Saerens, 2021 ; OEWB, 2021 ; Thyssen <i>et al.</i> , 2014
		Paletteries et caisseries			15		
		Menuiseries			3		
		Produits connexes			46		
	Panneautiers Wallonie	MDF	/	/	90	/	E. Letombe, communication personnelle, 2023
Produits connexes pour chauffage industriel		/	/	10			
F e u i l l u s	Scieries (1)	Entreprises de construction	/	/	16	2020	Defays & Saerens, 2021 ; OEWB, 2021 ; Thyssen <i>et al.</i> , 2014
		Paletteries et caisseries		/	1		
		Menuiseries		/	21		
		Entreprises d'usinage de traverses de chemins de fer		/	2		
		Produits connexes		/	60		
	Entreprises d'usinage de traverses de chemin de fer	Traverses de chemin de fer	/	/	90	/	Hypothèse
		Produits connexes	/	/	10		
	Industrie de la pâte à papier et du papier (2)	Papier	/	/	83	/	FCBA, 2022 ; E. Meurisse, communication personnelle, 2022 ; Wohlfrom, 2022 ; https://burgo-ardennes.be/
		Ecorces pour chauffage industriel			8		
		Liqueur noire			9		
M i x t e	Entreprises de construction	Construction	/	/	90	/	Wohlfrom, 2022
		Produits connexes	/	/	10		
	Paletteries et caisseries	Emballage, coffrage et transport	/	/	90	/	Wohlfrom, 2022
		Produits connexes	/	/	10		
	Menuiseries	Menuiserie	/	/	90	/	Wohlfrom, 2022
		Produits connexes	/	/	10		
	Granulation	Pellets	/	/	100	/	E. Bays, communication personnelle, 2015
	Panneautiers Flandre	Panneaux de particules	/	/	100	/	E. Letombe, communication personnelle, 2023
		Produits connexes	/	/	0		

(1) Les pourcentages pour les produits autres que les connexes sont tirés de Defays & Saerens (2021) en considérant que le bois qui va vers les négociants et les particuliers sera utilisé à 50% dans la construction et à 50% dans les menuiseries.

(2) L’utilisation de 2 t de bois sec permet d’obtenir 1 t de pâte à papier et 1 t de lignine concentrée à 17% (qui ne pèse plus que 212 kg lorsque la concentration en solides est portée à 80%). Par ailleurs, 2 t de papier couché sont produites à partir de 1 t de pâte. Ainsi, en considérant un

taux d'écorce massive moyen de 10 %, l'utilisation de 2,2 t de bois sec, avec écorces, permettra d'obtenir 200 kg d'écorces, 212 kg de lignine (concentrée à 80%) et 2 000 kg de papier couché, soit un rapport 8/9/83.

- **Fin de vie**

Tableau A9 : Informations supplémentaires sur les valeurs relatives à la fin de vie des différentes catégories de produits du schéma de la figure 5. Les valeurs en gras sont celles qui doivent être renseignées dans le logiciel CAT.

Produit	Fin de vie	Quantité (t)	Flux (%)	Année	Sources
Bois d'œuvre	Panneautiers Flandre	/	75	/	E. Letombe, communication personnelle, 2023
	Cogénération	117 000	20	2014	E. Bays, communication personnelle, 2015
	Chauffage industriel (1)	14 000	2	2013	OEWB, 2015
	Chauffage collectivités	6 100	1	2014	E. Bays, communication personnelle, 2015
	Chauffage résidentiel	12 670	2	2014	
	Décharge	/	0	/	E. Letombe, communication personnelle, 2023
Pellets	Génération*	0	0	2022	Wohlfrom, 2022
	Cogénération	8 266	15	2014	E. Bays, communication personnelle, 2015
	Chauffage industriel	1 700	3	2014	
	Chauffage collectivités	1 700	3	2014	
	Chauffage résidentiel	42 540	79	2014	
Panneaux de particules	Panneautiers Flandre	/	90	/	E. Letombe, communication personnelle, 2023 ; Wohlfrom, 2022
	Cogénération	/	10		
	Décharge	/	0		
Piquets, poteaux, tuteurs	Cogénération	/	100	/	Wohlfrom, 2022
MDF	Panneautiers Flandre	/	15	/	Hypothèse basée sur Unilin, communication personnelle, 2023
	Cogénération	/	85		
	Réemploi MDF	/	0		
	Décharge	/	0		
Traverses de chemin de fer	Cogénération	/	100	/	Hypothèse
Papier	Industrie de la pâte à papier et du papier (recyclage)	/	67	/	http://www.cobelpa.be/fr/cobelpa.html
	Cogénération	/	33		

*Depuis la fermeture de la centrale des Awirs en septembre 2020, il n'y a plus de centrale de génération en Wallonie. En accord avec Wohlfrom (2022) et pour refléter la situation actuelle, une valeur de 0 est attribuée au flux vers la génération. Le fait que les flux, pour une même catégorie, soient établis sur base de quantités provenant d'années différentes n'est cependant pas problématique dans ce cas-ci, car la fermeture de la centrale des Awirs n'a que peu affecté l'offre des pellets locaux (M. Neirinck, communication personnelle, 2023).

(1) La valeur de 14 000 t a été obtenue sur base des données du Panorabois édition 2015 (OEWB, 2015) en posant l'hypothèse que les bois recyclés représentent 15% des « autres bois » (Wohlfrom, 2022).

7.8. Annexe 8 : Répartition du bois récolté entre les catégories de produits

Tableau A10 : Répartition, pour les 10 pessières régulières, du volume de bois récolté (première utilisation) et du volume de bois recyclé (recyclage) entre les différentes catégories de produits. Les volumes sont donnés en m³ (partie supérieure du tableau) ou en pourcentages du total (% - partie inférieure du tableau).

		Première utilisation						Recyclage				
		Menuiserie	Bois énergie	Construction + MDF	Emballages, coffrage et transport	Papier	Piquets, poteaux, tuteurs	Total	Panneaux de particules	Bois énergie	Papier	Total
E100	m ³	31	702	603	155	10	36	1538	1465	478	13	1955
E88		27	628	535	136	9	36	1372	1247	424	11	1682
E82		25	588	499	126	8	36	1283	1138	396	10	1544
E70		21	504	422	104	7	36	1093	919	338	9	1265
E58		16	410	336	80	5	37	884	695	277	7	978
SE100		28	554	506	142	9	0	1240	1151	342	11	1504
SE88		26	512	467	131	8	0	1145	1063	315	10	1388
SE82		25	488	446	125	8	0	1092	1014	301	10	1325
SE70		22	432	391	109	7	8	968	882	272	9	1163
SE58		17	371	322	86	6	33	835	702	254	7	962
E100	%	2	46	39	10	1	2	100	75	24	1	100
E88		2	46	39	10	1	3	100	74	25	1	100
E82		2	46	39	10	1	3	100	74	26	1	100
E70		2	46	39	10	1	3	100	73	27	1	100
E58		2	46	38	9	1	4	100	71	28	1	100
SE100		2	45	41	11	1	0	100	77	23	1	100
SE88		2	45	41	11	1	0	100	77	23	1	100
SE82		2	45	41	11	1	0	100	77	23	1	100
SE70		2	45	40	11	1	1	100	76	23	1	100
SE58		2	44	39	10	1	4	100	73	26	1	100

7.9. Annexe 9 : Description du matériel supplémentaire

Le matériel supplémentaire est regroupé dans un dossier, dont le contenu est visible à la figure A3.

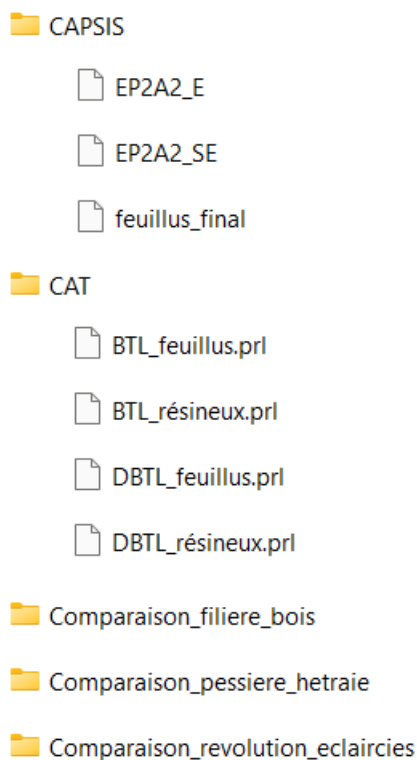


Figure A3 : Composition du dossier contenant le matériel supplémentaire de ce mémoire.

Dans le dossier CAPSIS se trouvent les projets Gymnos et Walsi qui ont été utilisés pour simuler les différents peuplements. Dans le dossier CAT se trouvent les quatre fichiers avec la caractérisation de la filière bois wallonne destinés à être ouverts sur CAT dans le gestionnaire de flux.

Le dossier « Comparaison_filiere_bois » contient le fichier d'entrée pour le logiciel CAT avec la coupe de 100 m³ et les fichiers de sortie avec les données brutes. Les deux autres dossiers contiennent chacun les fichiers de sortie du logiciel CAT avec les données brutes, les scripts réalisés sur le logiciel Rstudio pour traiter ces données et les fichiers de sortie avec les données traitées.