

Université Libre de Bruxelles

Institut de Gestion de l'Environnement et d'Aménagement du Territoire

Faculté des Sciences

Master en Sciences et Gestion de l'Environnement

**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**

Mémoire de Fin d'Etudes présenté par

Perrine WOHLFROM

En vue de l'obtention du grade académique de

Master en Sciences et Gestion de l'Environnement

Finalité Gestion de l'Environnement M-ENVIG

Année Académique : 2021-2022

Directeur : Prof. Wouter ACHTEN

Remerciements

Je tiens à remercier chaleureusement mon promoteur de mémoire le Professeur Wouter Achten, qui m'a guidé grâce à ses précieux conseils dans le choix du sujet et le suivi méthodologique de ce mémoire. Merci également aux Professeurs Marie-Françoise Godart et Thomas Bauler pour leurs retours et conseils lors de la séance de feedback de mi-parcours.

Un grand merci à Mathieu Fortin, développeur du logiciel CAT, pour ses explications et sa disponibilité à répondre à mes questions tout au long du mémoire malgré le décalage horaire qui nous sépare. Merci également à Gauthier Ligot de l'université Gembloux Agro-Bio Tech pour ses explications en sylviculture et sur le modèle de croissance GYMNOS qu'il a développé.

Un merci particulier à Eugène Bays, tout juste pensionné de l'Office Economique Wallon du Bois, et à mon collègue Lieven De Boever pour leurs précieuses explications sur la filière bois wallonne et pour avoir répondu à mes nombreuses questions.

Merci à toutes les personnes contactées de l'industrie du bois qui m'ont permis de réaliser la collecte des données nécessaire à cette étude : les entreprises Unilin, Burgo Ardennes, Peter Müller GmbH, Groupe François, RotorDC.

Merci à Christopher, scientifique et ami hors-pair, pour la relecture de ce travail et pour son esprit critique.

Merci à mes collègues de l'entreprise WOOD.BE, qui m'ont transmis la passion du bois et qui sont une source d'inspiration quotidienne.

Merci également à mes camarades d'action de l'asbl The Shifters Belgium pour leur motivation inépuisable et leur envie d'agir ensemble dans la transition bas-carbone de nos sociétés.

Et enfin merci à ma famille et mes amis proches pour leur soutien, et à toutes les personnes qui ont croisé ma route depuis mon arrivée dans la capitale belge il y a près de 5 ans. Votre présence et les bons moments passés ensemble me laissent des souvenirs mémorables.

Résumé

Le but de cette étude est d'évaluer le potentiel de stockage de carbone dans les produits bois comme levier dans l'atténuation du changement climatique, ainsi que les mesures à mettre en place qui permettraient d'améliorer ce stockage. Les produits bois ont cette capacité à séquestrer durant toute leur durée de vie le carbone absorbé par les arbres dont ils sont issus. Pour répondre à cette problématique, le cas du territoire wallon est étudié comme scénario de référence, et comparé à des scénarios alternatifs basés sur des changements dans le cycle de vie des produits (allongement de la durée de vie, recyclage, réemploi, influence du bois énergie, mise en décharge) pour mettre en évidence les pratiques les plus efficaces. La méthodologie choisie est celle du GIEC (*2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*) et considère la récolte de bois résineux en Wallonie qui sera ensuite transformée en Wallonie ou ailleurs. Outre le stock de carbone dans les produits bois sont aussi calculés l'accumulation de carbone non-dégradable séquestré de façon permanente en décharge, le flux de méthane de la décharge, les émissions fossiles de la transformation du bois et les émissions évitées par effet de substitution dans le cas d'une comparaison de deux scénarios. Le logiciel CAT (*Carbon Accounting Tool*) permet de façon simple de modéliser le diagramme de flux de la filière bois d'un territoire après en avoir collecté les données, et fourni les résultats mentionnés précédemment.

Les résultats de la situation actuelle en Wallonie montrent que les produits bois issus de bois résineux stockent à l'équilibre 48,86 MtCO₂eq, soit l'équivalent de 1,3 années d'émissions territoriales de la Wallonie. Les émissions fossiles correspondantes sont de 0,367 MtCO₂eq/an, ce qui représente 1% des émissions territoriales annuelles de la Wallonie. Face à l'industrie du ciment et de l'acier, bien plus énergivores et émettrices de gaz à effet de serre, la filière bois a ce double avantage d'avoir un impact environnemental très limité et la capacité à stocker du carbone durant des durées allant jusqu'à plusieurs dizaines d'années. La condition sine qua non est une gestion durable des forêts. Le levier dans l'atténuation du changement climatique de la filière bois est réel et non-négligeable, et il convient de l'améliorer grâce à la mise en place de mesures efficaces. Parmi ces mesures, l'allongement de la durée de vie des produits est selon les conditions étudiées la plus efficace. L'augmentation du recyclage et la mise en place progressive du réemploi permettent aussi d'améliorer le stockage carbone et les émissions fossiles et de méthane évitées, mais dépendent fortement des conditions initiales. L'utilisation de tout le bois récolté, ainsi que destiné à la décharge pour fabriquer des produits apporte un effet de substitution plus important que son utilisation en bois énergie. Ce dernier devrait être réservé aux connexes industriels et au bois en fin de vie, cela dépend cependant de la situation sur le territoire. Cette étude a permis de démontrer le potentiel très intéressant des produits bois dans l'atténuation du changement climatique, la prise de décision devra être complétée dans le secteur du bois par une analyse conséquentielle des futures décisions.

Mots-clés : produit bois, stockage carbone, puits de carbone, émissions fossiles, substitution

Abstract

The aim of this study is to assess the potential for carbon storage in wood products as a lever for climate change mitigation, and the measures that could be put in place to improve this storage. Harvested wood products have the capacity to sequester the carbon absorbed by the trees from which they are made throughout their life cycle. To address this issue, the case of the Wallonia territory is studied as a reference scenario, and compared to alternative scenarios based on changes in the life cycle of the products (extension of the life cycle, recycling, reuse, influence of wood energy, disposal in landfill) to highlight the most effective practices. The methodology chosen is that of the IPCC (2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories) and considers the harvesting of softwood in Wallonia which will then be transformed in Wallonia or elsewhere. In addition to the carbon stock in harvested wood products, the accumulation of non-degradable carbon permanently sequestered in landfills, the methane flow from the landfill, the fossil emissions from wood processing and the emissions avoided by substitution effect in the case of a comparison of two scenarios are also calculated. The CAT software (Carbon Accounting Tool) allows for a simple modelling of the flow chart of the wood sector of a territory after having collected the data, and provides the results mentioned above.

The results of the current situation in Wallonia show that harvested wood products from softwoods store 48,86 MtCO₂eq at equilibrium, which is equivalent to 1,3 years of Wallonia's territorial emissions. The corresponding fossil emissions are 0,367 MtCO₂eq/year, which represents 1% of Wallonia's annual territorial emissions. Compared to the cement and steel industries, which are much more energy-intensive and emit greenhouse gases, the wood sector has the dual advantage of having a very limited environmental impact and the capacity to store carbon for periods of up to several decades. The sine qua non condition is sustainable forest management. The wood sector's leverage in climate change mitigation is real and non-negligible, and should be improved through the implementation of effective measures. Among these measures, the extension of the life span of products is, according to the conditions studied, the most effective. Increasing recycling and phasing in reuse also improves carbon storage and avoids fossil and methane emissions, but is highly dependent on initial conditions. The use of all harvested wood, as well as that destined for landfill, to make products has a greater substitution effect than its use as wood energy. The latter should be reserved for industrial by-products and end-of-life wood, but this depends on the situation of the territory. This study has shown the very interesting potential of wood products in climate change mitigation, the decision making in the wood sector should be completed by a consequential analysis of future decisions.

Keywords: harvested wood products, carbon storage, carbon sink, fossil emissions, substitution

Table des matières

Remerciements.....	ii
Résumé.....	iii
Abstract.....	iv
Table des matières.....	v
Table des illustrations.....	vii
Partie 1: Introduction.....	1
1. Contexte.....	1
2. Problématique.....	2
3. Méthodologie générale.....	3
Partie 2: Généralités et état de l’art.....	4
2.1. La forêt comme puits de carbone.....	4
2.1.1. Le cycle court du carbone organique.....	4
2.1.2. Le puits de carbone de la forêt dans l’atténuation du changement climatique.....	5
2.1.3. Optimiser le puits de carbone de la forêt avec les produits bois.....	8
2.1.4. Gestion, enjeux stratégies et visions politiques.....	11
2.2. Etat de l’art de la filière bois en Wallonie.....	14
2.2.1. L’exploitation de la forêt wallonne et la récolte de bois.....	15
2.2.2. La transformation du bois en Wallonie.....	16
2.2.2.1. 1 ^{ère} transformation du bois.....	16
2.2.2.2. 2 ^{ème} transformation du bois.....	18
2.2.2.3. L’usage des produits bois.....	19
2.2.3. La fin de vie.....	19
2.2.3.1. La valorisation matière.....	20
2.2.3.2. La valorisation énergétique.....	21
2.2.3.3. La mise en décharge (centre d’enfouissement technique).....	22
2.3. Conclusion : Potentiel de la filière bois en Wallonie pour optimiser le puits de carbone du territoire.....	23
Partie 3 : Evaluation du stockage de carbone dans les produits bois en Wallonie.....	25
3.1. Périmètre d’étude.....	25
3.1.1. Approche considérée et frontières du système.....	25
3.1.2. Scénario de référence et scénarios alternatifs.....	26
3.1.2.1. Scénario de référence.....	26
3.1.2.2. Scénario alternatif 1 : Augmentation de la durée de vie des produits.....	28
3.1.2.3. Scénario alternatif 2 : Suppression de la mise en décharge.....	28
3.1.2.4. Scénario alternatif 3 : Augmentation du réemploi.....	29
3.1.2.5. Scénario alternatif 4 : Augmentation du recyclage.....	30
3.1.2.6. Scénario alternatif 5: Influence du bois énergie.....	30
3.2. Matériels et méthode.....	31
3.2.1. Méthode utilisée pour évaluer le stock de carbone dans les produits bois.....	31

3.2.2.	Logiciel CAT (<i>Carbon Accounting Tool</i>).....	34
3.2.3.	Plateforme CAPSIS (<i>Computer-Aided Projection of Strategies In Silviculture</i>).....	35
3.3.	Collecte des données.....	36
3.3.1.	Type de sylviculture.....	36
3.3.2.	Flux de transformation du bois en Wallonie.....	36
3.3.3.	Catégories des grumes.....	37
3.3.4.	Durée de vie moyenne des produits bois.....	37
3.3.5.	Facteurs de substitution.....	37
3.3.6.	Emissions fossiles de la transformation des produits bois.....	38
3.3.7.	Incertitude des différents paramètres.....	38
3.4.	Résultats et interprétation.....	39
3.4.1.	Stocks et flux de carbone du scénario de référence.....	39
3.4.2.	Impact des scénarios alternatifs sur les stocks et les flux de carbone.....	41
3.4.3.	Impact des scénarios alternatifs sur les produits bois.....	44
3.5.	Discussion.....	46
3.5.1.	Analyse des résultats.....	47
3.5.1.1.	Réponse à la première question de recherche.....	47
3.5.1.2.	Réponse à la deuxième question de recherche.....	48
3.5.2.	Analyse de sensibilité.....	50
Partie 4 :	Conclusion.....	53
4.1.	Récapitulatif et réponse à la problématique.....	53
4.2.	Limites de l'étude.....	54
4.3.	Perspectives.....	55
Annexes	56
Annexe 1:	Table de production sylvicole utilisée pour la modélisation de la croissance forestière.....	56
Annexe 2 :	Données des flux de la transformation du bois en Wallonie.....	57
Annexe 3 :	Catégories des grumes.....	60
Annexe 4 :	Durée de vie moyenne des produits bois.....	61
Annexe 5:	Facteurs de substitution.....	62
Annexe 6 :	Emissions fossiles de la transformation des produits bois.....	63
Annexe 7:	Stocks et flux de carbone du scénario de référence.....	64
Bibliographie.....		65

Table des illustrations

Figure 1: Réactions de photosynthèse et respiration. Source : (Godart, 2020).....	4
Figure 2: Le cycle court du carbone. Source : (Chiritescu)	5
Figure 3: Emissions anthropiques de CO ₂ et répartition entre les puits de carbone. Source: (IPCC, 2014)	6
Figure 4: Changement net des surfaces forestières entre 2000 et 2005. Source: (IPCC, 2007).....	7
Figure 5: Flux net des gaz à effets de serre des forêts entre 2001 et 2019.....	8
Figure 6: Classification simplifiée des produits bois basée sur la définition des produits forestiers de la FAO datant de 1982. Source: (IPCC, 2019a).....	9
Figure 7: Illustration de l'effet de cascade. Source : (Van der Lugt, 2020)	10
Figure 8: Organigramme de la filière bois en Wallonie. Source : (Frère H., 2022).....	14
Figure 9: Valorisation de la matière d'une grume de sciage. Source : (ValBiom, 2018).....	17
Figure 10: Schéma de différents produits bois pour la construction. Source: (CCTB, 2022).....	18
Figure 11: Représentation schématique de l'approche production utilisée dans cette étude.	26
Figure 12: Diagramme de flux de la filière bois en Wallonie, scénario de référence de cette étude	27
Figure 13: Composantes du diagramme de flux de l'interface CAT. Source : (Pichancourt J.-B., 2018)	34
Figure 14: Stocks (à gauche) et flux annuels (à droite) moyens de carbone durant la durée d'exploitation d'une parcelle d'un hectare.....	40
Figure 15: Différence des stocks de carbone (à gauche) et des flux de carbone (à droite) entre les scénarios alternatifs et le scénario de référence, moyenne à l'équilibre.....	41
Figure 16: Stock de carbone cumulé en fonction du temps.	43
Figure 17: Distribution des volumes de biomasse dans les catégories de grumes.....	45
Figure 18: Distribution des volumes de biomasse dans les classes de produits bois, sans recyclage (en haut) et avec recyclage (en bas).	45
Figure 19: Analyse de sensibilité des émissions fossiles pour le scénario de référence (à gauche) et des facteurs de substitution pour les scénarios alternatifs (résultats de la différence avec le scénario de référence, à droite)..	51
Figure 20: Stock de carbone cumulé en fonction du temps des scénarios selon l'analyse de sensibilité.	52
Figure 21: Evolution de stocks et des flux de carbone d'une parcelle d'un hectare, plantation à t=0..	64
Tableau 1: Types de bois et valorisation des déchets. Source: (UCM, 2013).....	20
Tableau 2: Valeurs de la durée de vie des produits dans le scénario de référence et le scénario alternatif 1	28
Tableau 3: Valeurs des flux de redirection en fin de vie des produits bois pour le scénario de référence et les scénarios alternatifs 2a et 2b.....	29
Tableau 4: Illustration des flux de la fin de vie des produits bois de la construction pour le scénario de référence et le scénario 2a. (logiciel CAT)	29
Tableau 5: Valeurs des flux de fin de vie des produits bois pour le scénario de référence et le scénarios 4	30
Tableau 6: Valeurs des flux de la récolte de résineux et du bois industriel pour le scénario de référence et les scénarios 5a et 5b.....	31
Tableau 7: Incertitude des différents paramètres pour le calcul de la comptabilité carbone	38
Tableau 8: Flux des émissions fossiles (substitution) et de méthane annuels évitées (colonne a) et stock de carbone à l'équilibre dans les produits bois (colonne b) de chaque scénario	43

Partie 1: Introduction

1. Contexte

Depuis le début de la révolution industrielle, les émissions anthropiques de gaz à effet de serre dans l'atmosphère, comme le CO₂ provenant de la combustion des énergies fossiles, n'ont cessé de croître de manière exponentielle. La communauté scientifique, à l'instar du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC, *IPCC* en anglais) reconnaît que les émissions anthropiques sont bien responsables du changement climatique ainsi que ses conséquences dramatiques et désastreuses pour l'avenir de l'humanité et de la biodiversité (IPCC, 2021).

Parmi les nombreuses stratégies d'atténuation du changement climatique, la forêt présente des particularités intéressantes puisque les arbres absorbent et séquestrent le CO₂ de l'atmosphère sous forme de carbone grâce à la photosynthèse. La séquestration nette globale de carbone de la forêt correspond à près de 10% de toute la biomasse (Cardellini, 2018). Ce potentiel de puits de carbone peut être optimisé de différentes manières : (i) par l'augmentation et le maintien de la surface forestière, grâce à la reforestation et l'arrêt de la déforestation ; (ii) par l'augmentation de la densité de carbone dans la forêt et sur le territoire, grâce à la replantation après récolte, à l'agroforesterie ou à la réduction de l'érosion du sol ; (iii) par l'augmentation du stock de carbone hors site via les produits bois ; (iv) par l'augmentation de la bioénergie et la substitution grâce aux produits bois qui remplacent des matériaux comme le béton ou l'acier et des énergies fossiles (IPCC, 2007) (Cardellini, 2018) (Ashton M., 2012). La surface forestière mondiale diminue depuis au moins 30 ans car elle est sujette à la déforestation, bien qu'en Europe la surface des forêts augmente légèrement chaque année (IPCC, 2007). Des projets de reforestation existent ou ont existé, certains d'entre eux se sont soldés par une très faible survie des arbres à cause de la non-adaptabilité des arbres plantés au territoire (Holl K., 2020). La gestion durable des forêts s'avère essentielle pour lutter contre la déforestation et garantir l'accès à la ressource bois, elle est pratiquée dans 90% des forêts exploitées des pays développées, mais seulement 6% des forêts exploitées dans les pays en développement (Ashton M., 2012) (IPCC, 2007). Les produits bois ont cette double fonction de stockage du carbone au-delà de la durée d'exploitation de l'arbre, et de substitution à des matériaux et combustibles plus énergivores. Ils permettent de répondre à de nombreux besoins de nos sociétés (besoin en bois, en fibre et en énergie).

Le bois est donc une ressource renouvelable qu'il est particulièrement intéressant d'exploiter au mieux pour tirer tous les bénéfices du stockage du carbone dans la forêt et les produits bois. Des accords ou programmes internationaux en ont progressivement pris conscience ces dernières années : les Accords de Paris suite à la COP21 en 2015, la stratégie de l'Union Européenne pour la bioéconomie en 2018 et le « Green Deal » européen en 2020 en sont quelques exemples majeurs. En Wallonie aussi, le Plan

wallon des déchets-ressources de 2018 et « Circular Wallonia » en 2020 visent à améliorer la gestion des produits bois. Il est indispensable que les futures actions et décisions politiques pour le secteur du bois prennent en compte le potentiel d'atténuation du changement climatique des produits bois grâce au stockage carbone et à la substitution.

2. Problématique

Le potentiel de stockage de carbone et de substitution des produits bois s'étudie à une échelle locale ou régionale que globale, pour pouvoir y intégrer tous les aspects territoriaux de la foresterie, la filière de transformation du bois et l'approvisionnement en énergie. Pour cela, la Wallonie présente un cas d'étude intéressant. La Wallonie est recouvert à 33% de forêts, dont 85% de celles-ci sont exploitées. L'industrie du bois y est historiquement très présente et concentre la grande majorité de la 1^{ère} transformation du bois en Belgique. Chaque année, l'exploitation des forêts produit plus de 4 millions de m³ de bois, qui sont ensuite transformés par la filière bois wallonne ou exportés. Cette quantité de bois représente donc un potentiel de stockage carbone et de substitution importants pour la Région qu'il convient d'analyser et de quantifier. Outre ces avantages, il faut aussi prendre en compte l'énergie et la chaleur nécessaires lors de la transformation du bois dans l'industrie qui émet du CO₂, et la décomposition du bois dans les décharges qui émet également du CO₂ mais aussi du méthane CH₄, un gaz à effet de serre environ 30 fois plus impactant que le CO₂. La filière bois doit être étudiée dans l'ensemble du cycle de vie des produits bois pour pouvoir estimer au mieux les bénéfices nettes en terme de stockage carbone. Cela fera l'objet de la première question de recherche : **Dans quelles mesures les produits bois peuvent-ils être une solution pour stocker le CO₂ de l'atmosphère, et ainsi atténuer le changement climatique ?**

Les différentes politiques publiques tentent de favoriser la filière bois depuis des années, elles misent notamment beaucoup sur l'augmentation du recyclage, la fin de la mise en décharge et sur l'augmentation du bois énergie en substitution aux énergies fossiles. Or, à notre connaissance, aucune étude approfondie pour évaluer le réel avantage en terme de stockage carbone dans les produits et de substitution n'a été réalisée pour ces décisions politiques. Sans quantifier ces aspects, il n'est pas possible de savoir si les conséquences de ces décisions sont vraiment avantageuses, ou au contraire minimales, voire contre-productives pour l'atténuation du changement climatique. De plus, les utilisateurs interviennent également dans le cycle de vie des produits bois, et ont également un rôle dans l'augmentation de l'efficacité de ces produits. Afin de mettre en avant les stratégies de transformation du bois, d'usage et de fin de vie des produits les plus efficaces, différents scénarios seront étudiés pour répondre à la deuxième question de recherche : **Comment adapter l'économie circulaire des produits bois et le changement des usages pour améliorer de manière efficace et durable le stockage du carbone ?**

3. Méthodologie générale

Pour répondre aux deux questions de recherche, un outil de comptabilité carbone analysant l'ensemble de la filière bois est nécessaire. Grâce à l'article de Brunet-Navarro et al., comparant 41 modèles de bilan carbone du cycle de vie des produits bois selon plusieurs caractéristiques (Brunet-Navarro P., 2016), le choix de l'outil pouvant répondre au mieux à la problématique s'est porté sur le logiciel CAT (*Carbon Accounting Tool*) (Pichancourt J.-B., 2018) (Fortin M., 2012). D'après Brunet-Navarro et al, ce logiciel est l'un des outils les plus complets pour la comptabilité carbone. Il permet de modéliser sur une interface utilisateur simple la filière bois d'un territoire, de la récolte à la fin de vie. Le logiciel calcule pour un scénario donné le stock de carbone dans la forêt et les produits bois, ainsi que différents flux : (i) la substitution aux énergies fossiles ; (ii) les émissions fossiles de la transformation du bois ; (iii) l'accumulation de carbone non-dégradable en décharge ; (iv) les émissions de méthane de la décomposition du bois en décharge. Grâce à son analyse multidimensionnelle, le logiciel CAT peut être utilisé pour supporter de futures décisions régionales pour le secteur du bois.

La méthodologie utilisée dans cette étude pour répondre à la problématique, et dont en découle le plan de cette étude, est la suivante :

- La définition du périmètre d'étude : l'approche production du rapport *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories* est considérée. Cette approche tient compte du bois récolté sur un territoire donné pour analyser le stockage carbone dans les produits bois à l'origine de ce bois. Le scénario de référence (correspondant au territoire wallon réel) et plusieurs scénarios alternatifs impliquant des changements dans la filière bois ont été définis.
- La définition des matériels et méthodes : la méthode de comptabilité carbone dans les produits bois suit la méthodologie Tier 1 des *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Pour réaliser des modélisations dans ce logiciel, il est également nécessaire d'y intégrer un modèle de croissance forestière, provenant de la plateforme CAPSIS.
- La collecte des données : pour pouvoir modéliser le territoire considéré, un grand nombre de données spécifiques sont nécessaires. Il s'agit de la sylviculture des peuplements d'arbres, des différents flux de transformation du bois dans l'industrie et les émissions fossiles associées, de la durée de vie moyenne des produits et des facteurs de substitution des produits. Ces données ont été collectées dans des rapports de l'industrie bois, dans la littérature générale et grâce à des estimations d'experts.
- La modélisation, l'analyse des résultats et l'interprétation : pour chaque scénario, mais aussi pour la comparaison de deux scénarios, le logiciel CAT donne les résultats des stocks et flux de carbone. Ces résultats sont analysés, comparés entre eux et discutés pour pouvoir répondre aux questions de recherche.

Partie 2: Généralités et état de l'art

2.1. La forêt comme puits de carbone

2.1.1. Le cycle court du carbone organique

La forêt, en tant que biomasse vivante, est une composante importante du cycle court du carbone organique. Elle est composée d'essences d'arbres¹, de différents végétaux, mais également de mycètes, lichen (association de cyanobactérie et champignon) et d'autres bactéries. Les arbres, comme tous les végétaux et une série de bactéries, sont des organismes autotrophes et photosynthétiques, ils sont le siège de la réaction de photosynthèse : avec l'énergie du soleil ils capturent le dioxyde de carbone de l'atmosphère qui, combiné à l'eau et aux minéraux extraits du sol, leur permettent de produire leur biomasse. La résultant est le dioxygène qui est libéré dans l'atmosphère. La réaction de photosynthèse est balancée par le relâchement de CO₂ lors de la réaction inverse de respiration, ou celle de décomposition, ou durant des évènements naturels tels des feux de forêts. La respiration, qui permet aux organismes de produire l'énergie nécessaire à leur métabolisme, se produit spontanément chez les végétaux et chez les animaux qui utilisent les végétaux pour leur nourriture, tandis que la décomposition, qui est la consommation de matière organique par les micro-organismes, a lieu à la fin de la vie de la plante ou de la partie perdue de l'arbre (feuilles, branches non innervées, ...) (Figures 1 et 2).

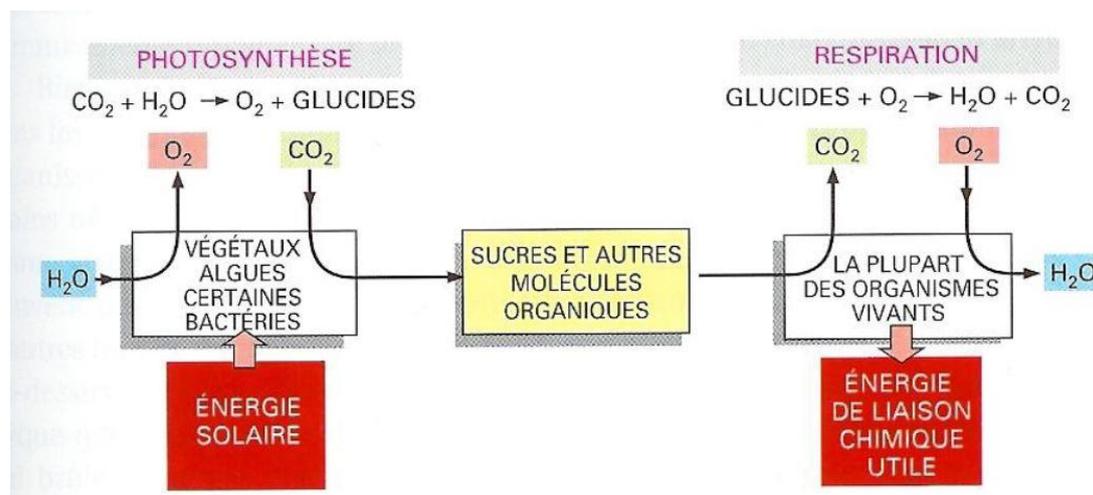


Figure 1: Réactions de photosynthèse et respiration. Source : (Godart, 2020)

¹ Une essence d'arbre est une espèce d'arbre

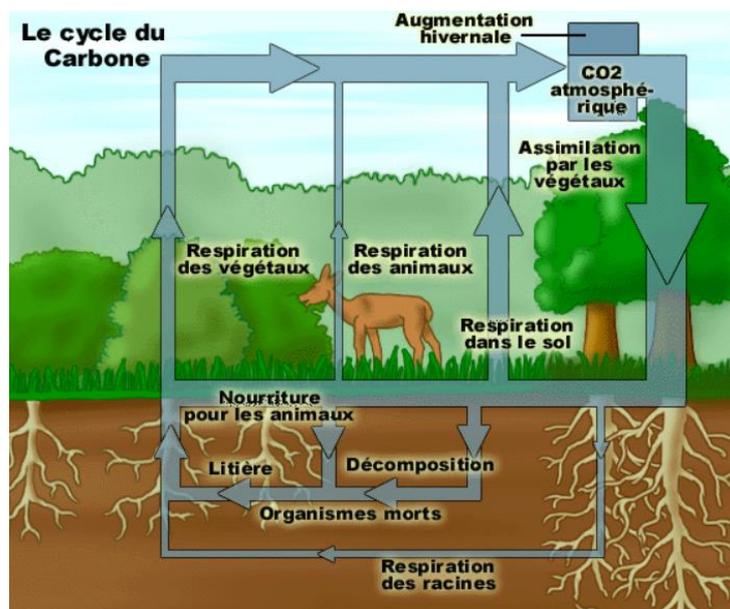


Figure 2: Le cycle court du carbone. Source : (Chiritescu)

Chaque année durant la croissance des végétaux, le flux net de ce cycle est positif, ce qui constitue la production primaire de carbone organique. Les végétaux absorbent donc plus de CO₂ de l'atmosphère qu'ils n'en relâchent, on parle alors de puits de carbone. Le carbone de l'atmosphère reste séquestré dans la biomasse et dans le sol jusqu'à la fin de sa vie, où il sera relâché dans l'atmosphère via la décomposition par les micro-organismes ou la combustion (Fleischmann F., 2020).

2.1.2. Le puits de carbone de la forêt dans l'atténuation du changement climatique

Grâce à sa fonction de puits de carbone, la biomasse terrestre permet d'accumuler une partie des émissions de CO₂ d'origine anthropique². La Figure 3 montre la répartition des émissions de CO₂ anthropiques dans les différents puits de carbone : environ 44% dans l'atmosphère, 26 % dans les océans (biomasse océanique et dissolution du CO₂ dans l'eau) et 30% dans la biomasse terrestre. La séquestration nette globale de carbone dans la biomasse terrestre est de $2,4 \pm 0,4$ GtC/an ($2,4 \pm 0,4$ PgC/an), soit l'équivalent de $8,8$ GtCO₂/an. La forêt à elle seule retient 9 à 10% des émissions de CO₂ de la biomasse terrestre (Cardellini, 2018). Actuellement, le stock de carbone actuel de la forêt est estimé à 359 GtC (IPCC, 2007) .

Selon la Figure 3, toutes les émissions anthropiques de CO₂ sont absorbées par les trois puits de carbone. Or, ces émissions augmentent de manière exponentielle depuis le début de l'ère industrielle. La biomasse et les océans étant des puits à capacité limitée (croissance limitée de la biomasse et saturation de la dissolution du CO₂ dans l'océan sous l'effet de la température), le surplus de CO₂ se retrouve dans l'atmosphère, engendrant une augmentation de l'effet de serre et donc de la température terrestre

² Provenant des combustibles fossiles (charbon, gaz, pétrole), formés et enfouis depuis des millions d'années et faisant parti du cycle long du carbone, par opposition au cycle court

(Pattyn, 2021). Selon le GIEC, il est absolument certain que les émissions anthropiques sont les causes principales du changement climatique et de ses conséquences (IPCC, 2021).

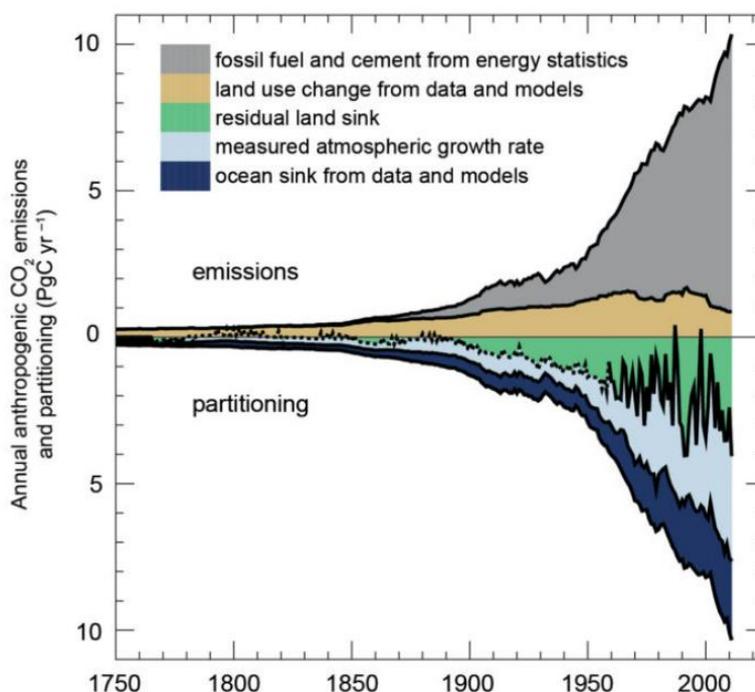


Figure 3: Emissions anthropiques de CO₂ et répartition entre les puits de carbone. Source: (IPCC, 2014)

Face à ce constat, l'augmentation de la biomasse terrestre pourrait permettre d'atténuer le changement climatique. La forêt, qui recouvre environ 30% de la surface terrestre, peut donc jouer un rôle majeur (IPCC, 2007). Cependant, depuis 1990, la surface forestière nette mondiale a progressivement diminué de 8 millions d'hectares par an en moyenne pour atteindre 3.952 millions d'hectares en 2005 (IPCC, 2007). La diminution nette de la surface forestière s'explique par la prédominance de la conversion des forêts en terres agricoles ou en surfaces artificialisées en opposition aux efforts de la reforestation, la restauration des paysages et l'expansion naturelle du couvert forestier. Néanmoins, on constate une différence entre les continents, puisque les surfaces forestières augmentent en Europe et en Asie, mais diminuent dans le reste du monde, surtout les forêts tropicales sud-américaines, asiatiques et africaines (Figure 4).

La communauté internationale a pris conscience dès le protocole de Kyoto en 1997 (Vieillefosse A., 2006), et a officialisé lors des Accords de Paris (IPCC, 2015), que le secteur forestier est stratégique pour l'atténuation du changement climatique et peut aider les pays à atteindre leurs objectifs de réduction des émissions. Suite au protocole de Kyoto ont été mis en place des quotas d'émissions annuels autorisés pour chaque pays, ainsi que le marché des émissions carbone (*Emission Trading System*). Dans le cadre du mécanisme de développement propre (*Clean Development Mechanism*), un pays qui implémente un projet de réduction des émissions dans les pays du Sud a le droit de recevoir

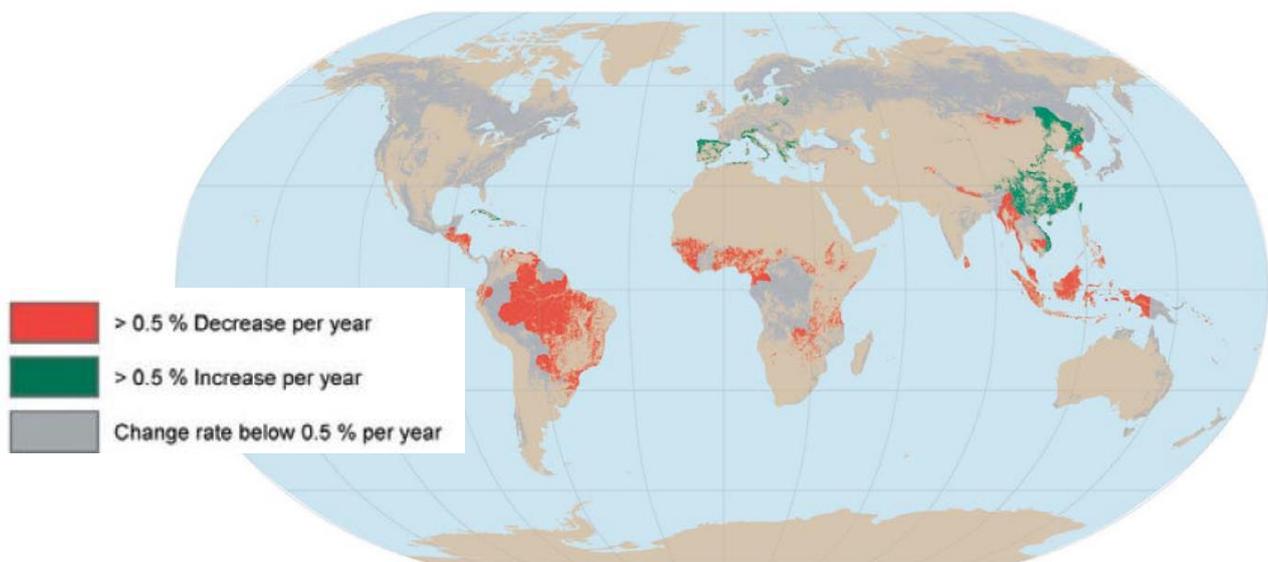


Figure 4: Changement net des surfaces forestières entre 2000 et 2005. Source: (IPCC, 2007)

un crédit de réduction d'émission (*Certified Reduction Emission*), l'aidant ainsi à atteindre les objectifs du protocole de Kyoto (United Nations, 2022). La reforestation fait partie de ces projets qui permettent d'obtenir des crédits carbone. Ce système a accéléré et démocratisé les projets de plantation d'arbres, surtout dans les pays du Sud, mais aussi dans les pays du Nord. De nombreuses entreprises, multinationales et organisations non gouvernementales (ONG) dans le monde entier ont lancé des projets de plantation d'arbres dans le cadre du mécanisme de développement propre, ou pour des raisons sociales, écologiques et esthétiques. Bastin et al. estime que la capacité de charge de la planète à une augmentation du couvert forestier est de 900 millions d'hectares, ce qui permettrait un stockage de carbone supplémentaire de 205 GtC, la totalité des forêts absorberait alors entre 15 à 20% des émissions anthropiques mondiales, contre 9 à 10% aujourd'hui (Bastin J.-F., 2019). Cependant, reforester est loin d'être simple. Un projet de reforestation doit être minutieusement préparé pour considérer le contexte socio-écologique du territoire et comporte plusieurs points cruciaux : plantation diversifiée d'essences indigènes³ et adaptées au changement climatique de la région, respect des populations locales pour leur besoin en agriculture et accès à l'eau, engagement à long terme pour la gestion de la nouvelle forêt, etc. (Holl K., 2020) Un exemple d'échec est le projet de reforestation Grain-for-Green du gouvernement chinois dans le plateau semi-aride du Loess (le plus grand projet de reforestation au monde) qui n'a pas respecté ces points cruciaux (plantation de monocultures forestières dans des régions arides), ce qui a mené à une diminution du débit des rivières et des surfaces agricoles ainsi qu'une perte de biodiversité (Rose Kelly B., 2016).

Il ne faut pas oublier que la fonction de puits de carbone de la forêt repose sur un équilibre systémique fragile et réversible. Des boucles de rétroactions positives et négatives impactent la variation de la

³ Une espèce indigène est une espèce naturellement native d'une région particulière

concentration de CO₂ dans l’atmosphère et de la température. Ainsi, si la réaction de photosynthèse est augmentée avec une plus grande concentration de CO₂, et donc plus de séquestration de carbone (boucle de rétroaction négative), l’augmentation de la température terrestre provoque une augmentation de la respiration des plantes, et donc plus d’émission de CO₂, ainsi qu’une augmentation de la mortalité des arbres due à la sécheresse et aux maladies (boucle de rétraction positive) (Ashton M., 2012). Au-delà d’une certaine température qui dépend de la région et des espèces, la capacité des plantes à absorber le CO₂ diminue, et elles peuvent devenir des sources nettes de carbone. Ce point de basculement a déjà été observé dans certaines régions du monde durant les deux dernières décennies (Figure 5) et récemment dans la forêt amazonienne (Boulton C., 2022). Il est donc urgent de réduire les effets du changement climatique, pour éviter un point de basculement global des forêts.

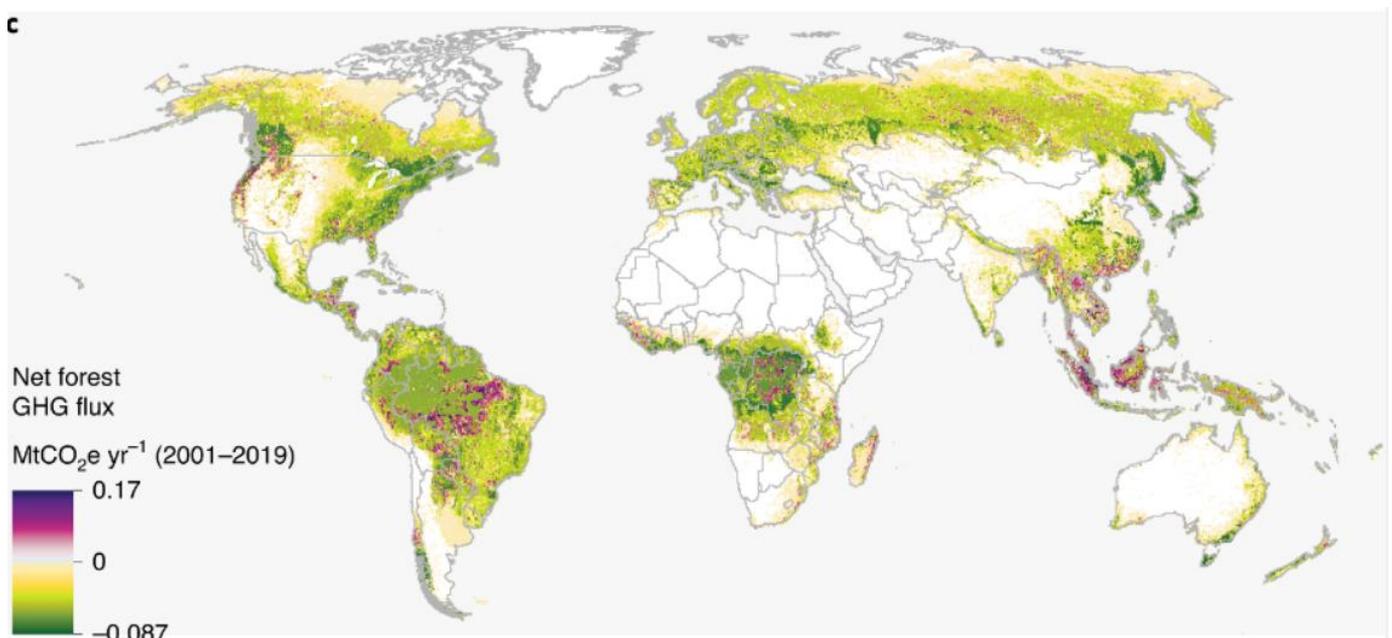


Figure 5: Flux net des gaz à effets de serre des forêts entre 2001 et 2019. Les valeurs positives correspondent à de émissions nettes, tandis que les valeurs négatives correspondent à une séquestration nette.

Source: (Haris N., 2021)

2.1.3. Optimiser le puits de carbone de la forêt avec les produits bois

Comme décrit précédemment, le puits de carbone de la forêt est extrêmement important et peut être optimisé grâce à des projets de reforestation minutieusement préparés, adaptés au contexte du territoire et suivi sur le long terme. Un autre levier de la forêt dans l’atténuation du changement climatique sont les produits bois, issus de la récolte forestière, qui peuvent y contribuer de deux manières :

- En gardant le carbone séquestré pendant une durée supplémentaire, retardant ainsi les émissions de CO₂ dans l’atmosphère par décomposition ou combustion en fin de vie.
- Par effet de substitution, en substituant des énergies et matériaux d’origine fossiles pour la fabrication de produits et la génération d’énergie.

Le stock de carbone global des produits bois est estimé entre 4,1 Gt et 20 GtC, avec un taux de séquestration net entre 0,026 et 0,139 GtC/an (Ashton M., 2012). Comparé aux 359 GtC de stock de carbone mondial des forêts estimées par le GIEC en 2007, les produits bois sont une composante mineure du budget carbone global du secteur forestier. Il représente donc un potentiel d'amélioration intéressant qui sera discuté dans cette étude.

Les produits bois proviennent de la récolte de bois en forêt, qui est ensuite transformé de manière industrielle en produits finis répondant à des usages différents. La Food and Agricultural Organization of the United Nations (FAO) a établi une classification simple des différents produits bois (Figure 6).

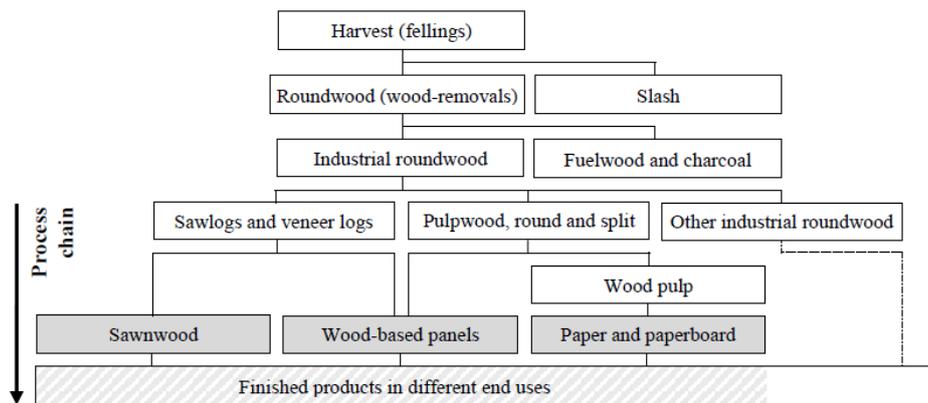


Figure 6: Classification simplifiée des produits bois basée sur la définition des produits forestiers de la FAO datant de 1982. Source: (IPCC, 2019a)

Durant la fabrication des produits bois, des émissions de CO₂ ont lieu lors de leur transformation dans l'industrie : l'énergie (chaleur et électricité) est soit achetée soit produite sur place, le plus souvent en brûlant les co-produits de bois. L'utilisation de la biomasse comme source d'énergie permet de réduire les émissions liées à la fabrication, puisque de nombreux auteurs s'accordent à dire que la biomasse est une énergie neutre en carbone car elle ne génère pas d'émissions nettes de carbone issus du cycle court du carbone, le CO₂ relâché dans l'atmosphère étant absorbé par la croissance des arbres (Ashton M., 2012). Le transport du bois de la forêt au site de production est une autre source d'émission de carbone.

La durée de vie des produits bois joue un rôle majeur puisque c'est cette durée qui permet de décaler dans le temps les émissions du carbone stocké dans le bois par décomposition à sa fin de vie, et donc d'augmenter le stockage. Certains produits bois ont des durées de vie courtes, comme le bois énergie ou le carton d'emballage, d'autres peuvent stocker le carbone pendant des décennies. C'est le cas notamment dans la construction, où certaines charpentes peuvent dépasser 100 ans.

La fin de vie des produits bois peut être très diverse :

- La mise en décharge, bien que souvent critiquée, pourrait en réalité constituer un puits de carbone supplémentaire, grâce à la lente décomposition du bois. En condition anaérobie, la

décomposition du bois génère du méthane CH₄, un gaz à effet de serre environ 30 fois plus impactant que le CO₂. S'il est émis dans l'atmosphère, il peut annuler les bénéfices du délai du stockage du carbone, mais s'il est récupéré et utilisé comme source d'énergie, il se substitue à des sources d'énergie fossiles. En réalité, moins d'un tiers des émissions de carbone des décharges est capturé (Ashton M., 2012).

- La combustion du bois émet sous forme de CO₂ le carbone que l'arbre avait séquestré durant sa croissance par photosynthèse : le bilan global de carbone est nul. De plus, la chaleur produite, si elle est récupérée, se substitue à d'autres sources d'énergie plus intense en carbone, notamment les combustibles fossiles.
- Le recyclage et la réutilisation des produits bois permettent de prolonger la durée de stockage du carbone dans le bois. En général, un produit en bois est recyclé en un produit à plus faible teneur en bois, tandis que la réutilisation conserve la fonction du produit. Le recyclage peut avoir lieu plusieurs fois jusqu'à ce que la valeur ou qualité du bois ne permette plus de fabriquer un nouveau produit, il deviendra alors du bois énergie ou sera mis en décharge. Ce principe s'appelle l'effet de cascade (Figure 7).

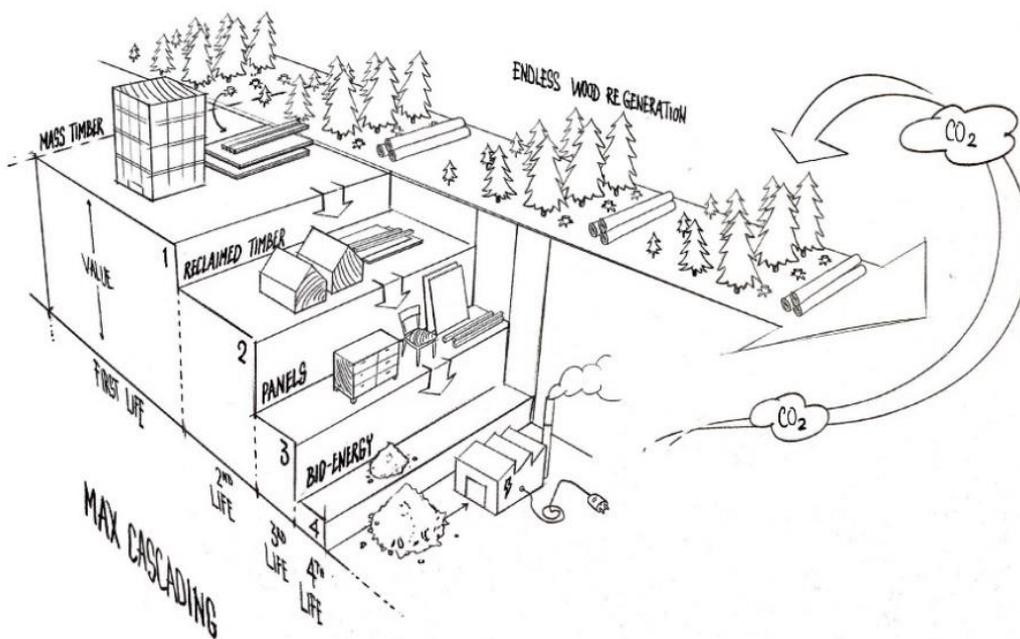


Figure 7: Illustration de l'effet de cascade: une construction massive en bois est récupérée pour construire une habitation plus petite, puis le bois massif est transformé en panneaux de bois pour l'ameublement, ces panneaux deviennent enfin du bois énergie pour la production de chaleur et d'électricité. Source : (Van der Lugt, 2020)

De la récolte du bois à la fin de vie du produit, l'effet de substitution peut intervenir, produisant une réduction nette des émissions de gaz à effet de serre. Les émissions de gaz à effet de serre liées à la substitution sont de différents aspects (Ashton M., 2012) :

- Les émissions de combustibles fossiles durant la durée de vie du produit : par exemple, une charpente en bois requiert moins d'énergie pour sa fabrication qu'une charpente en acier.

- Le remplacement des combustibles fossiles par de la biomasse : comme expliqué plus haut, le bilan global du carbone issu de la biomasse (cycle court du carbone) est nul.
- Le changement du stock de carbone dans la forêt, dans les produits bois et en décharge.
- Les émissions de gaz à effet de serre de réactions chimiques liées à des process industriels, comme la fabrication de ciment et d'acier.

2.1.4. Gestion, enjeux stratégiques et visions politiques

La récolte annuelle de bois représente 3 milliards de m³, mais ce chiffre est sous-estimé car il ne prend pas en compte l'exploitation illégale. Les plantations d'arbres pour la récolte de bois représentent 5% des surfaces forestières mondiales (Ashton M., 2012). Une gestion intensive et efficace des récoltes de bois pour subvenir aux besoins de notre société crée donc des opportunités d'améliorer la protection et la conservation des forêts non exploitées, ce qui contribue à l'atténuation du changement climatique. Cependant, une gestion forestière basée sur la productivité de bois pour fabriquer davantage de produits finis, et ainsi augmenter la substitution à d'autres produits plus intenses en énergie et carbone, n'est pas une solution durable et soutenable. Un arbre coupé équivaut à conserver son stock de carbone dans les produits bois, mais ce stock n'augmente plus. Il est donc primordial de replanter à minima le même nombre d'arbres après chaque coupe.

Pour qu'une forêt soit considérée comme un puits de carbone selon les accords nationaux et internationaux sur les émissions des gaz à effets de serre, une gestion durable doit être planifiée (FAO, 2020). Bien qu'il soit difficile de trouver un consensus global pour définir une gestion forestière durable à cause de la grande diversité des types de forêts et des contextes socio-économiques, la FAO précise qu'une gestion forestière durable « peut être considérée comme l'utilisation durable et la conservation des forêts dans le but de maintenir et d'améliorer les multiples valeurs de la forêt par des interventions humaines. L'homme est au centre de cette gestion car il vise à contribuer aux divers besoins de la société à perpétuité » (FAO, 2020). Sur le long-terme, les stratégies de gestion durable permettent de maintenir, voire d'augmenter le stock de carbone du secteur forestier, tout en produisant les besoins en bois, fibre et énergie de nos sociétés : les effets d'atténuation seront optimisés. Or, en 2007, environ 90% des forêts exploitées dans les pays développés, et seulement 6% dans les pays en voie de développement répondent à une gestion planifiée et approuvée (Ashton M., 2012) (IPCC, 2007).

Des certifications officielles existent pour prouver la gestion durable des forêts, les plus utilisées globalement sont la certification PEFC (*Program for the Endorsement of Forest Certification Schemes*) et FSC (*Forest Stewardship Council*) (PEFC, 2022) (FSC, 2022). En plus de garantir la gestion durable des forêts selon l'impact environnemental, social et économique, ces certificats suivent aussi toute la chaîne de valeur pour certifier les produits dont le bois est issu de forêts gérées durablement.

Grâce à une gestion durable des forêts, il est donc possible d'améliorer le puits de carbone, c'est-à-dire réduire les émissions et augmenter la séquestration, du secteur forestier, et donc des produits bois. Les différentes stratégies existantes sont les suivantes (IPCC, 2007) :

- Augmenter et maintenir la surface forestière, grâce à la reforestation et l'arrêt de la déforestation
- Augmenter la densité de carbone dans la forêt et sur le territoire, grâce à la replantation après récolte, à l'agroforesterie ou à la réduction de l'érosion du sol et de la dégradation
- Augmenter le stock de carbone hors site via les produits bois (la récolte annuelle étant inférieure à la croissance annuelle)
- Augmenter la bioénergie et la substitution grâce aux produits bois qui remplacent des matériaux comme le béton ou l'acier et des énergies fossiles

Pour pouvoir implémenter des politiques efficaces concernant la gestion du stock de carbone dans les produits bois au niveau national et international, il est donc essentiel de bien comprendre quel rôle peuvent jouer les produits bois dans le cycle global du carbone, ainsi que les facteurs qui encourageront ou non son utilisation : le prix, la technologie, la croissance économique, le marché, la qualité, la quantité, les facteurs socioéconomiques. Les produits bois proviennent d'une industrie cyclique et s'inscrivent dans l'économie mondialisée tirée par la croissance. Les mesures politiques peuvent introduire une demande sur le long terme des produits bois pour encourager les investissements viables sur le plan économique et environnemental. Le recyclage et l'effet de cascade doivent être encouragés par des primes ou du financement, car ces pratiques retardent les émissions du carbone des produits bois, même ceux à durée de vie courte (Ashton M., 2012).

Suite au protocole de Kyoto, pendant des années les responsables politiques n'avaient pas pris en compte le rôle des produits bois dans l'atténuation du changement climatique, ni le lien entre la gestion de la forêt et le cycle de vie des produits bois. Une accélération de la prise de conscience de l'urgence climatique a eu lieu lors de la COP21 en 2015, et les Accords de Paris, ratifiés par 197 pays, les encourageait à « conserver et renforcer, selon qu'il convient, les puits et réservoirs de gaz à effet de serre [...] notamment les forêts » (IPCC, 2015). Chaque Etat a ensuite dû établir sa feuille de route nationale pour respecter les Accords de Paris. De nombreux pays ont donc mis en place une politique forestière et des produits bois pour favoriser l'atténuation au changement climatique et la décarbonation. En France, la Stratégie Nationale Bas Carbone veut développer les surfaces et la santé des forêts pour augmenter le stockage du carbone, développer l'utilisation du bois pour des usages à longue durée de vie et réserver la valorisation énergétique aux coproduits et produits en fin de vie (Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire, 2015).

En 2018, l'Union Européenne adopte une stratégie ambitieuse pour la bioéconomie, pour réduire sa dépendance aux énergies fossiles. Elle reconnaît aux ressources bio-sourcées leur potentiel de puits de carbone, de substitution aux énergies fossiles et de production faible en énergie (European Commission,

2018). Cette stratégie implique une forte augmentation des produits bois, dont une large part de bois énergie, et donc une intensification de l'exploitation de la biomasse, qui n'est pas sans susciter des interrogations sur les conséquences environnementales. Certains Etats, dont la France, ont mis en place des incitations financières pour le développement de centrales thermiques à bois, ce que dénoncent dans une lettre ouverte 500 scientifiques et économistes (Angerand, 2021) : si 2 % de l'énergie mondiale devait provenir du bois, cela entraînerait un doublement des prélèvements forestiers, associés aux émissions du carbone qui seraient restées stocké dans la forêt sans cela. L'utilisation de co-produits et déchets de production de l'industrie pour générer de la chaleur et de l'électricité ne nécessite pas de prélèvement additionnel de bois.

En 2020, l'Union Européenne adopte le « Green Deal », dont fait partie le Plan d'action pour l'économie circulaire. Ce plan implémente des mesures pour favoriser la circularité - réutilisation, reconditionnement, recyclage - de plusieurs catégories de produits ou d'usages. La construction est présentée comme un levier important pour réduire les émissions de carbone grâce au stockage long-terme du carbone, à l'utilisation et à la réutilisation des produits bois pour la construction (European Commission, 11.03.2020). En pratique, des projets de recherche européens sont financés régulièrement pour mettre en application des actions efficaces dans le cadre du Green Deal et de ce plan pour l'économie circulaire. Le projet interrégional FCRBE - *Facilitating the Circulation of Reclaimed Building Elements* - est un partenariat entre centres de recherche, entreprises et administrations qui vise à développer un contexte technique et législatif favorable au réemploi des matériaux de déconstruction des bâtiments, dont de nombreux produits bois (éléments de structure, bois massif, menuiserie, ...) (Gobbo E., 2021).

En Wallonie, le Gouvernement a adopté en 2018 le Plan wallon des déchets-ressources (Gouvernement wallon, 2018) et en 2021 la stratégie de déploiement de l'économie circulaire « Circular Wallonia » (Service Public de Wallonie, 2021). Le Plan wallon des déchets-ressources vise à réduire le volume de matière consommée et de déchets incinérés, et à augmenter l'éco-conception des biens, le réemploi et le recyclage. Les produits bois concernés sont ceux des déchets de construction et démolition et les emballages ménagers et industriels. Des appels à projets ont vu le jour et sont encore en cours. La stratégie « Circular Wallonia » concerne six filières porteuses pour l'économie circulaire, dont la construction et les bâtiments. Elle permet notamment la transposition dans le droit wallon de la Directive CE 2018/851 sur la gestion des déchets, qui veut encourager la démolition sélective pour faciliter le réemploi et le recyclage haute qualité des matériaux (objectif de 70% de revalorisation matière), et des systèmes de tri des déchets de construction et démolition pour le bois (Parlement européen, 2018).

2.2. Etat de l'art de la filière bois en Wallonie

Les informations données dans le paragraphe sur la filière bois en Wallonie proviennent en grande partie du PanoraBois Wallonie, édité par l'Office Economique Wallon du Bois (Bays, 2021).

La filière bois en Wallonie se schématise selon l'infographie ci-dessous. Un schéma complet et chiffré avec les volumes de production des résineux a été réalisé pour cette étude (voir paragraphe 3.1.2.1.).

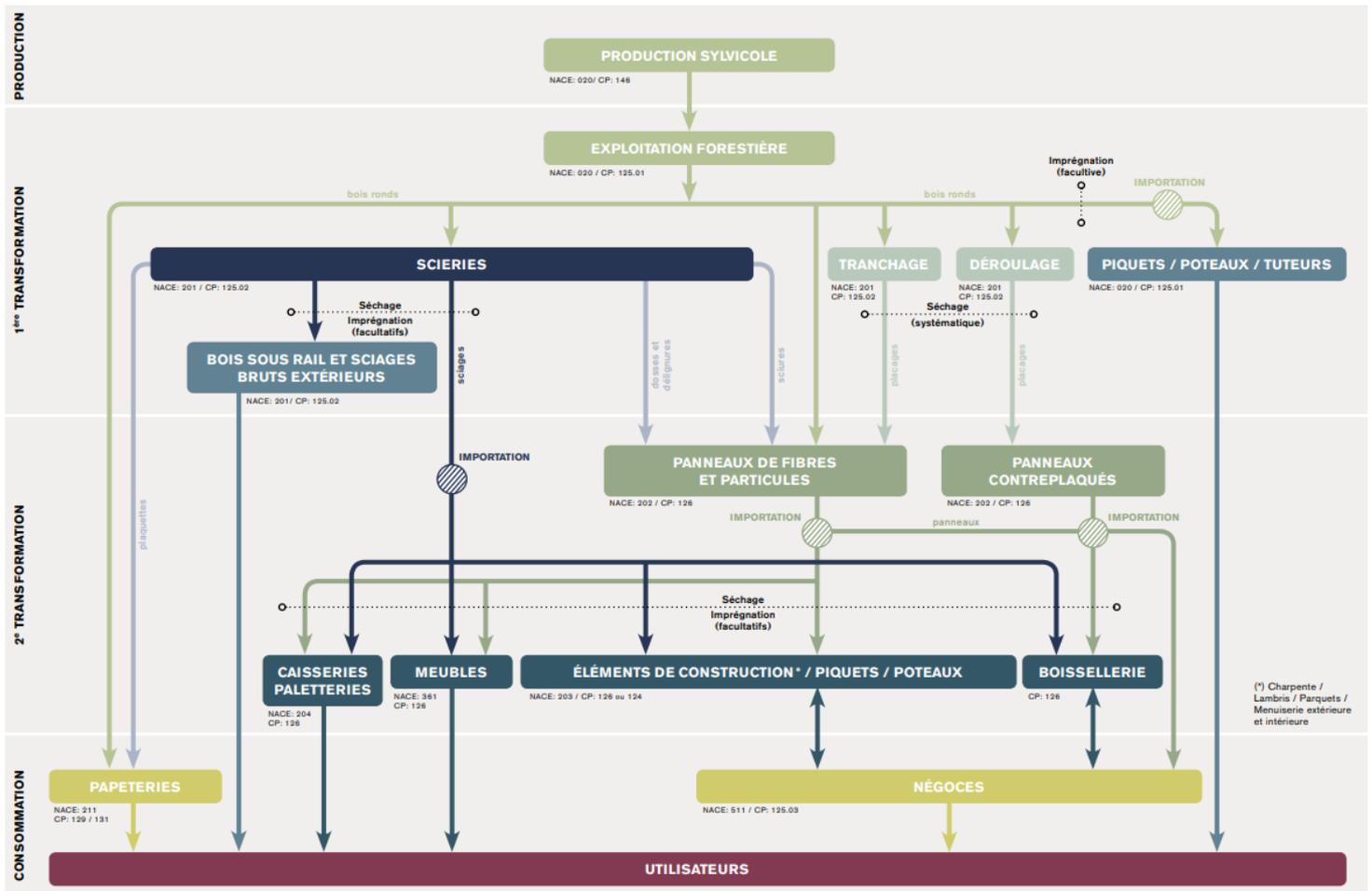
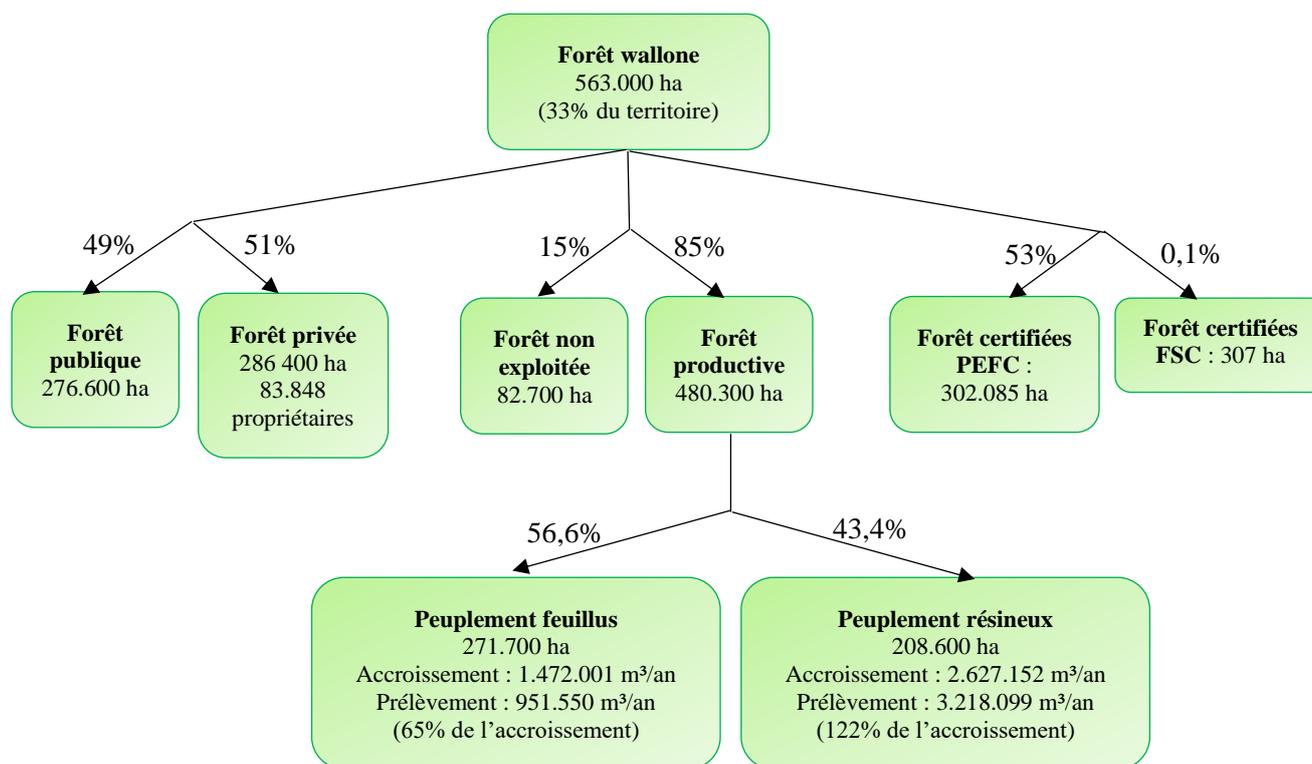


Figure 8: Organigramme de la filière bois en Wallonie. Source : (Frère H., 2022)

La filière bois wallonne représente 8.171 entreprises (physiques et morales) en 2021, contre 7.813 en 2012. Cela représente environ 12.200 emplois. En comparaison, les mêmes catégorie d'activités en Flandres représentent 16.926 entreprises et près de 39.000 emplois en 2021. Les activités en Wallonie sont surtout celles au plus proche de la forêt (exploitation et 1^{ère} transformation du bois), alors qu'en Flandres, elles sont majoritairement dans la 2^{ème} transformation du bois et le commerce et négoce. En effet, la surface boisée en Wallonie est quatre fois supérieure à celle en Flandres.

2.2.1. L'exploitation de la forêt wallonne et la récolte de bois

L'infographie ci-dessous résume en quelques chiffres les caractéristiques de la forêt wallonne et de la récolte de bois pour la période 2004-2017. Les feuillus comprennent les hêtres, les chênes, les frênes, les peupliers et les bouleaux majoritairement, et les résineux sont représentés par les épicéas, les Douglas, les mélèzes et les pins.



Dans le Code Forestier, le Gouvernement wallon prévoit un objectif de maintenir 53% de feuillus et 47% de résineux. Or, il y a actuellement 57% de feuillus et 43% de résineux, et la récolte des résineux (prélèvement) est supérieure à l'accroissement annuel de la forêt. Le Gouvernement doit réagir en replantant des résineux. De plus, le prélèvement des résineux à hauteur de 122% de l'accroissement peut surprendre, puisque cela signifie qu'une plus grande quantité de résineux est récoltée par rapport à l'accroissement naturel : ceci est dû à l'arrivée au terme d'exploitation des forêts plantées après-guerre. Entre 2018 et 2021, la forêt wallonne a subi une crise de scolytes (un insecte xylophage parasitant les arbres jusqu'à provoquer leur mort) ce qui provoqua une coupe prématurée des épicéas pour éviter la mort et la transmission du scolyte. Le prélèvement est montée durant cette période jusqu'à 143% de l'accroissement.

Une fois les bois ronds⁴ récoltés, ils sont transformés en Wallonie, en Belgique, ou exportés. L'industrie du bois wallonne importe aussi beaucoup de bois rond de l'étranger. Les chiffres des importations et

⁴ Un bois rond est un bois dans son état naturel après abattage, avec ou sans écorce, avant sa première transformation industrielle. La grume est un synonyme du bois rond.

exportations des bois ronds et bois de sciage (après découpe en scierie) existent, mais leur interprétation est complexe pour la raison suivante : beaucoup de bois ronds et de sciage ne font que transiter par la Belgique (venant des pays limitrophes pour être exportés par le port d'Anvers, ou inversement) et sont donc comptabilisés dans les importations et les exportations, ce qui fausse l'analyse. Cependant, une des tendances observées est l'exportation du bois de feuillus en Asie par bateau, notamment en Chine, pour y être transformés en produits bois qui reviendront ensuite en Europe. Ceci est dû à de faibles capacités de transformation du feuillus en Wallonie, et au coût de la main d'œuvre nettement moins chère en Asie.

2.2.2. La transformation du bois en Wallonie

Suite à l'exploitation forestière, les grumes sont dirigées vers différentes industries en Wallonie ou exportées. En fonction de leur diamètre et de leur essence, les grumes sont classifiées selon ces trois catégories :

- Bois énergie : les plus petites grumes, c'est-à-dire les arbres les plus jeunes, mais également les co-produits de la transformation deviennent du bois énergie pour le chauffage.
- Bois d'industrie : plus grandes que les grumes de bois énergie, ces grumes vont être transformées en panneaux et pâte à papier.
- Bois d'œuvre : de plus gros diamètre, les grumes sont dirigées vers les scieries pour être transformées en produits en bois massifs : construction, ameublement, emballages, ...

La transformation du bois s'effectue communément en deux étapes : la 1^{ère} transformation dont les opérations sont effectuées sur le bois ronds pour obtenir des produits semi-finis, et la 2^{ème} transformation qui permet d'obtenir les produits finis.

2.2.2.1. 1^{ère} transformation du bois

Les scieries absorbent une grande partie des grumes provenant de l'exploitation forestière pour les transformer en produits semi-finis : plots, planches, charpentes, etc. Le bois est classé, séché, raboté et conditionné selon les règles du secteur. La grande majorité des scieries wallonnes transforment le bois de résineux : 2.500.000 m³ de résineux contre 72.000 m³ de feuillus en 2020, importations incluses. Il existe également quelques scieries de bois tropicaux. Les scieries produisent environ 50% de co-produits, appelés connexes (écorce, sciure, dosse, délignure, plaquette) qui sont valorisées en panneaux de bois, pâte à papier, compost et bois énergie (Figure 9). Ainsi, les scieries valorisent tous les déchets de coupe.

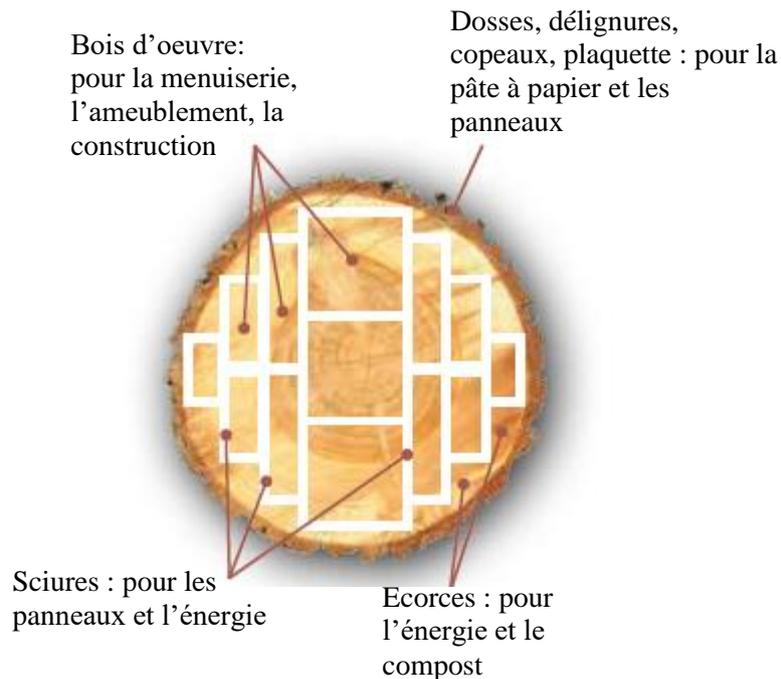


Figure 9: Valorisation de la matière d'une grume de sciage. Source : (ValBiom, 2018)

Les chantiers de découpe sont spécialisés dans la découpe en billons⁵ des petits et moyens bois ronds résineux. Les billons ainsi produits peuvent alors être écorcés, planés ou imprégnés sur le chantier même ou vendus tels quels à des entreprises de travail du bois rond (bois écorcés, fraisés ou profilés), des scieries et des producteurs de panneaux. Les entreprises de travail du bois rond transforment les billons venant des chantiers de découpe en piquet, poteaux et tuteurs pour des applications extérieures.

Le déroulage et le tranchage consistent à obtenir des feuilles de placage de 0,5 à 3,5 mm d'épaisseur à partir d'un billon écorcé et humidifié par étuve à vapeur ou immersion dans l'eau chaude, qui sont utilisées en décor d'ameublement. En Wallonie, seuls quelques entreprises réalisent encore le déroulage, mais plus le tranchage du bois.

Le séchage et l'imprégnation du bois sont systématiques ou facultatifs pour un certain nombre de produits semi-finis (voir Figure 8). Des entreprises se sont spécialisées dans ces procédés, des investissements très importants ont notamment été fait au cours des dernières années dans la construction de séchoirs à bois en Wallonie. L'imprégnation du bois est un traitement permettant de préserver le produit bois des agressions extérieures durant son utilisation (moisissures, insectes, intempéries) par l'imprégnation d'un produit chimique à la surface du bois. Les procédés d'imprégnation sont par trempage ou en autoclave (avec de la pression), avec des produits chimiques à base de sels métalliques ou de substances actives insecticides.

⁵ Un billon est un morceau de la grume coupé à longueur fixe (de 1 à 2,5 m en fonction de sa destination en bois d'industrie ou bois énergie)

2.2.2.2. 2^{ème} transformation du bois

L'industrie du panneau en Belgique se situe davantage en Flandres, avec de gros producteurs de panneaux de particule et de panneaux OSB (*oriented strand board*). En Wallonie, il reste une seule usine de MDF (*middle density fiberboard*) et HDF (*high density fiberboard*). Les panneautiers reçoivent comme matière première des connexes de scierie (plaquettes, dosses, sciures), du bois d'industrie et du bois post-consommation qu'il est possible de recycler en panneaux. Les étapes de transformation de cette matière première en panneaux sont complexes et dépendent du type de panneau. Il est possible de les résumer ainsi : le bois est d'abord broyé et séché ou défibré à la vapeur, les particules ou fibres sont enduites d'une résine synthétique (à base de phénol-formaldéhyde, mélamine ou isocyanate), un matelas est formé qui est ensuite pressé à haute température et pression pour faire durcir la résine et former le panneau.

Les produits bois de la construction se divisent en deux catégories : les produits non-structuraux et structuraux. Dans les produits non-structuraux, on retrouve les menuiseries, le parquet, le bardage, etc. Les produits structuraux peuvent être relativement simples, comme une charpente en bois massif, ou issus de divers procédés d'ingénierie pour former le bois à des structures architecturales complexes, de grande dimension et résistance, grâce à un assemblage par pressage avec une résine : on parle de bois lamellé-collé (*Glue Laminated Timber*), bois lamellé-croisé (*Cross Laminated Timber*), bois abouté et/ou contrecollé, etc. La Figure 10 illustre schématiquement la structure de ces produits, issus en grande majorité de résineux.

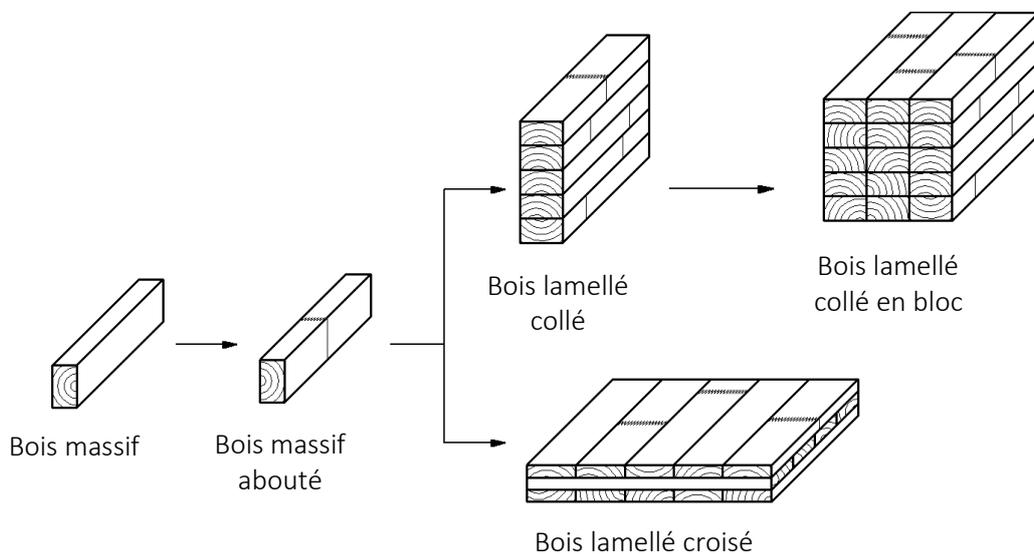


Figure 10: Schéma de différents produits bois pour la construction. Source: (CCTB, 2022)

Les produits d'emballages comprennent les palettes, les caisses et bobines. La palette est un produit très couramment utilisé, qui est normé (palettes EPAL) ou non, et qu'il est d'usage de réparer. C'est pourquoi il y a de nombreuses entreprises de fabrication et réparation de palettes en Wallonie.

L'industrie de la pâte à papier et du papier utilise comme matière première du bois d'industrie, des connexes et beaucoup de papier recyclé (environ deux tiers de l'approvisionnement). Dans le cas de bois vierge (presque exclusivement des feuillus), la transformation consiste à cuire les copeaux de bois avec des produits chimiques pour faire évaporer l'eau et séparer la cellulose de la lignine. La lignine est concentrée pour produire de la liqueur noire, qui est brûlée dans les centrales de cogénération pour la valorisation énergétique. Aux fibres de cellulose sont ajoutées une certaine quantité de charges minérales (kaolin, talc, ...) et des adjuvants en fonction du type de papier à obtenir. On distingue le papier hygiène (papier toilette, essuie-tout, ...), le papier couché (pour l'impression de magazines), le papier non-couché (papier journal et pour l'écriture) et le papier d'emballage. En Wallonie, il ne reste qu'un seul fabricant de pâte à papier et papier.

La fabrication d'ameublement concerne l'industrie du meubles, mais aussi beaucoup d'artisans menuisiers et ébénistes. En Wallonie, il existe quelques industriels et marques de mobilier, tournées vers le haut de gamme. Les menuisiers et agenceurs sur-mesure sont plus nombreux. Les fabricants utilisent du bois massif, des panneaux de bois, et les petites entreprises arrivent à récupérer du bois comme des palettes pour les revaloriser, ce qui est difficile à atteindre pour les grands industriels, car un maillon de la chaîne du réemploi est souvent manquant.

2.2.2.3. L'usage des produits bois

Après les étapes de logistique et de distribution des produits bois vient la phase d'usage chez le consommateur. La maintenance et l'entretien sont nulles ou très faibles pour un grand nombre d'entre eux : ameublement intérieur, papier, etc. Pour les produits bois de construction et d'extérieur (bardage, meubles de jardin, etc), un entretien régulier permet de conserver longtemps leurs qualités structurelles et esthétiques face aux intempéries, à l'humidité et aux UV du soleil. Il s'agit alors de les entretenir en appliquant une couche de protection tous les 2 à 15 ans en fonction du traitement.

2.2.3. La fin de vie

Une fois la fin de leur première utilisation, selon leur type, les produits bois peuvent être jetés dans les ordures ménagères, dans les déchets ménagers « papier-carton », ou être amenés dans les centres de collecte, appelés Recyparcs en Wallonie. A l'horizon 2025, il est prévu de collecter environ 110.000 tonnes de déchets bois dans les Recyparcs wallons, contre 107.000 tonnes en 2013. Concernant les papiers et cartons collectés sélectivement en porte à porte, cela représente 132.000 tonnes en 2013, soit 37 kg par habitant. A cela s'ajoutent les ordures ménagères brutes, qui contiennent environ 12% de papier et cartons et 0,4% de bois (Gouvernement wallon, 2018).

Le bois se classifie en trois classes (Tableau 1), issues du secteur professionnel de gestion des déchets, chacune ayant des modes de valorisation en fin de vie spécifiques. Bien qu'il n'y ait pas de valeur réglementaire à cette classification, elle définit la valeur marchande des déchets.

Tableau 1: Catégories de bois et valorisation des déchets. Source: (UCM, 2013)

Classe de bois	Déchets	Produits	Valorisation en fin de vie
Bois A	Bois non traité et non peint	Bois brut, palettes, cagettes, planches, poutres, ...	Matière : Fabrication de panneaux, pellets et papier Thermique : Chauffage individuel, collectif et industriel (chaudière à bois, compacteur à pellets), séchage du bois
Bois B	Bois traités ou peint et non dangereux	Meubles, menuiseries, panneaux de bois, bois d'œuvre, ...	Matière : fabrication de panneaux, de papier, de sols stratifiés Thermique : chauffage, combustion
Bois C	Bois traités dangereux	Produits traités à la créosote (traverses de chemin de fer, ...) ou autoclavés et imprégnés de sels métalliques (piquets, palissades, ...)	Thermique : usines d'incinération de déchets spéciaux, fours de cimenteries

2.2.3.1. La valorisation matière

La valorisation matière concerne les connexes industriels de bois et les produits bois post-consommation. Elle se traduit par le recyclage et le réemploi. L'approvisionnement de ces filières étant multiples, un suivi quantifié est difficile et peu d'informations chiffrées existent.

Le recyclage consiste à utiliser les déchets de bois comme matière première secondaire pour la réalisation d'autres produits. Les produits post-consommation nécessitent d'être collectés dans les centres de collecte Recyparcs, puis ils sont envoyés vers un centre de tri des déchets bois pour être triés et broyés selon différentes granulométries en vue du recyclage. Les déchets broyés et les connexes sont revalorisés en produits, le plus souvent par les fabricants de panneaux de particules, ou par les fabricants de pellets s'il s'agit de bois de type A. En Wallonie, il n'existe aucun fabricant de panneaux de particules, une grande partie des déchets bois est ainsi dirigée en Flandres où les grands panneautiers peuvent absorber ce flux : leur process permet en effet de produire des panneaux de particules contenant jusqu'à 95% de bois recyclé.

Le recyclage est une valorisation très courante dans l'industrie du papier. La collecte sélective suit les filières en place pour la collecte des déchets d'emballage ménagers et industriels. Après le tri, les papiers

qualitatifs et non souillés peuvent être recyclés. C'est ainsi que le papier recyclé représente les deux tiers de l'approvisionnement en fibre du secteur papier belge en 2010 (inDUfed, 2022).

Le réemploi des produits bois, sans ou avec peu de remise à neuf (on parle de reconditionnement) est un scénario de fin de vie plus marginal, bien que nécessitant le moins d'énergie pour revaloriser le produit. Il y a le réemploi entre particuliers, via des brocantes ou plateformes de seconde main sur Internet, et également des professionnels qui collectent, réparent, nettoie et remettent à neuf les produits, parfois avec une garantie. C'est le cas de la coopérative bruxelloise RotorDC, spécialisée dans la déconstruction sélective des matériaux du bâtiment et la vente de matériaux de réemploi, donc le bois de construction ou menuiserie (RotorDC, 2022), et de la plateforme Opalis, un annuaire de professionnels qui revendent des matériaux de construction de réemploi (Rotor asbl, 2022). Concernant l'ameublement, plusieurs ressourceries, entreprises sociales et circulaires du secteur de la réutilisation des biens et des matières, existent sur le territoire wallon. Elles sont représentées par la fédération RESSOURCES, qui a conclu avec le Gouvernement wallon une convention-cadre pour développer des initiatives en matière de réutilisation (Gouvernement wallon, 2018).

2.2.3.2. La valorisation énergétique

La valorisation énergétique, aussi appelée valorisation thermique, fait intervenir trois sources de bois : les connexes de l'industrie du bois (écorces, plaquettes, copeaux, sciures), les produits post-consommation (voir Tableau 1), ainsi que le bois issu de l'exploitation forestière, appelé bois énergie (bois rémanents, taillis, bûches, pellets ou granulés).

La combustion de la biomasse est la technologie de loin la plus développée. Elle libère immédiatement de l'énergie sous forme de chaleur, qui peut être utilisée pour le chauffage direct, ou converti en électricité par l'intermédiaire d'une turbine et d'un alternateur (génération). Lors de la conversion de la chaleur en électricité, si une partie de la chaleur est récupérée pour le chauffage, on parle de cogénération. La cogénération a lieu dans une centrale de production d'électricité grâce aux technologies des cycles turbine-vapeur ou des moteurs à vapeur.

La gazéification est présente en Wallonie par 2 unités de productions, développée par une société wallonne. Le principe consiste en la transformation thermochimique de la biomasse en un mélange de gaz combustibles. La biomasse se décompose à une température supérieure à 1000°C et en présence de gaz réactifs (oxygène, dioxyde de carbone, vapeur d'eau) en gaz de synthèse appelé « syngaz » qui contient de l'hydrogène, du monoxyde de carbone (ces deux gaz étant combustibles), du dioxyde de carbone, du goudron et de l'eau. Le syngaz permet donc de produire de la chaleur, de l'électricité ou de la cogénération (ValBiom).

Les rendements électriques et thermiques des systèmes de combustion sont très différents (ValBiom, 2018) :

- Génération électrique pure : rendement électrique 30-35%
- Cogénération : rendement électrique 10-30% ; rendement thermique 50-90%
- Production thermique pure : rendement thermique de 10% (foyers ouverts) à 95% (chaudière à plaquettes ou à pellets)

En Wallonie, les installations à biomasse solide produisant de la chaleur, et de l'électricité si cogénération, se répartissent entre le secteur privé des entreprises et le secteur public des collectivités :

- Production de chaleur : Le secteur privé compte 149 installations de chauffage au bois pour une puissance thermique totale de 397 MW (incluant la chaleur issus des cogénérations). La taille des installations varie de quelques dizaines de kW à 100 MW. Les installations sont principalement situées dans la filière bois (les scieries, menuiseries et papeteries possèdent souvent leur propre installations pour valoriser leurs co-produits en chaleur directement dans leur production), mais aussi dans l'agro-alimentaire et dans la production d'énergie (vente de chaleur via les réseaux de chaleur et/ou électricité). Le secteur public ressource dans les collectivités 103 installations pour une puissance totale de 26,5 MW.
- Cogénération : Les entreprises et collectivités comptent 14 sites de cogénération à partir de connexes bois, pellets ou liqueur noire (provenant de papeterie). Ces installations totalisent une puissance de 288 MW thermique et 208 MW électrique, chacune comprise entre 0,1 et 59 MW. Les principaux producteurs de chaleur et d'électricité sont les entreprises de l'industrie du bois qui utilisent les connexes de leur production.
- Génération : la centrale des Awirs était la seule centrale de génération d'électricité à partir de bois. Elle a fermé en 2020.

La Wallonie possède sept producteurs de pellets pour une production de près de 500.000 tonnes, la plupart étant des scieries qui ont intégré une unité de pelletisation. Les pellets sont principalement destinés au chauffage domestique, même si la demande est faible et le marché concurrentiel. La Wallonie possède également 3 producteurs de briquettes et buchettes en bois densifié (ValBiom, 2018).

2.2.3.3. La mise en décharge (centre d'enfouissement technique)

Malgré les efforts mis en place par les pouvoirs publics pour valoriser les déchets bois, une petite fraction de ces déchets collectés via les ordures ménagères finit en décharge, appelé centre d'enfouissement technique. La Wallonie dispose d'une vingtaine de centres qui acceptent les déchets ultimes, c'est-à-dire les déchets non valorisables. Les ordures ménagères brutes contiennent entre 50 et

70 % de matières organiques fermentescibles, en grande partie des matières animales et végétales. Le papier et carton sont moyennement biodégradables, tandis que le bois est peu biodégradable. La dégradation de ces déchets organiques en centre d'enfouissement intervient grâce à l'activité microbiologique :

- En milieu aérobie, c'est-à-dire en présence d'oxygène (proche de la surface), la microflore décompose les déchets organiques en CO₂ et vapeur d'eau (voir le paragraphe 2.1.1. sur le cycle court du carbone organique), à une température proche de 60°C.
- En milieu anaérobie (en l'absence d'oxygène), les bactéries méthanogènes transforment la matière organique en méthane CH₄.

Le biogaz produit contient environ 55% de méthane, 45% de dioxyde de carbone, et des traces de dihydrogène, diazote et dioxygène ou autres composés organiques (ISSeP, 2010). Pour ne pas laisser ces gaz à effets de serre s'échapper dans l'atmosphère, les centres d'enfouissement procèdent de plus en plus au captage de ces gaz pour les utiliser comme source d'énergie. Il peut s'agir d'envoyer le biogaz dans des centrales thermiques afin de produire de l'électricité, ou dans une moindre mesure, dans les véhicules roulant au gaz naturel.

La partie non-dégradable de la matière organique s'accumule dans le centre d'enfouissement et le carbone est considéré comme y étant stocké de façon permanente.

2.3. Conclusion : Potentiel de la filière bois en Wallonie pour optimiser le puits de carbone du territoire

Le calcul suivant peut nous aider à estimer la mesure du potentiel de la filière bois en Wallonie : l'exploitation des forêts wallonnes permet de récolter chaque année en moyenne 951.550 m³ EBR (équivalent bois rond) de bois feuillus et 3.218.099 m³ EBR de résineux (voir paragraphe 2.2.1.). La conversion en tonnes sèches permet de connaître la masse de bois récoltés. La fraction de carbone du bois sec étant de 0,5, cela mène à la masse de carbone stocké dans le bois. En multipliant la masse de carbone par le facteur 44/12, nous obtenons la masse de CO₂ absorbée par les arbres pour produire la biomasse.

	Feuillus	Résineux	Conversion
Récolte de bois/an	951.550 m ³	3.218.099 m ³	
Quantité de bois	475.775 tonnes sèches	1.399.873 tonnes sèches	1 tonne sèche bois ronds feuillus = 2 m ³ 1 tonne sèche bois ronds résineux = 2,3 m ³ Source : (Bays, 2021)
Quantité de carbone stocké	238.000 tonnes de C	700.000 tonnes de C	1 kg de bois sec contient environ 0,5 kg de carbone. Source : (IPCC, 2019a)
Quantité de CO₂ absorbé	872.000 tonnes de CO ₂	2.566.000 tonnes de CO ₂	Absorption de CO ₂ = 44/12*stock de carbone (M _{CO₂} = 44 g.mol ⁻¹ ; M _C = 12 g.mol ⁻¹) Source : (IPCC, 2019a)
Total	3.439.000 tonnes de CO ₂		

La quantité de bois récoltée annuellement en Wallonie correspond à l'absorption de près de 3,4 MtCO₂eq de l'atmosphère. Si l'on considère les émissions de gaz à effets de serre territoriales annuelles d'un Wallon moyen, à hauteur de 9,8 tCO₂eq en 2019 (Bureau Fédéral du Plan, 2022), alors cela signifie que le bois récolté annuellement stocke les émissions de gaz à effet de serre de 351.000 Wallons.

Les émissions territoriales calculent uniquement les émissions de gaz à effet de serre du territoire, mais omettent les flux d'importation et d'exportation de l'énergie et des produits manufacturés qui sont consommés sur le territoire et à l'étranger. Pour prendre en compte ces flux, il faut utiliser l'indicateur de l'empreinte carbone. L'empreinte carbone d'un Belge moyen est estimée à 16 tCO₂eq par an (Marbaix P., 2018). Le même calcul permet alors de montrer que le bois récolté annuellement stocke l'équivalent de l'empreinte carbone de 215.000 Belges.

Cette démonstration rapide est bien sûre hautement théorique et contient des approximations et des manques : transport et transformation dans l'industrie du bois par des machines qui génèrent du CO₂, durée de vie très courte du bois énergie qui relâche rapidement le carbone stocké dans l'atmosphère, substitution des produits bois à des produits ou sources d'énergies et évitant des émissions de CO₂, émissions de méthane en décharge. Néanmoins, la quantité de carbone impliqué chaque année dans les produits bois et son équivalent CO₂ sont loin d'être négligeables. Cela prouve que les produits bois disposent d'un potentiel de stockage du carbone de la biomasse, qu'il convient d'optimiser au maximum pour que ce stockage soit le plus long et efficace possible et que des bénéfices dans l'atténuation du changement climatique puissent en être tirés. La mesure de ce potentiel de stockage carbone est précisément le but de cette étude et sera évaluée dans la partie suivante grâce à l'exemple du territoire wallon.

Partie 3 : Evaluation du stockage de carbone dans les produits bois en Wallonie

La recherche sur l'évaluation et la gestion des potentiels du secteur forestier pour stocker le carbone est très étendue. De nombreuses études ont mises en avant des méthodes et des modèles pour comptabiliser le carbone stocké dans la forêt et les produits bois. Cependant, les incertitudes et variables sont nombreuses. Cette étude se focalise uniquement sur le stockage de carbone dans les produits bois, et ne prend pas en compte la forêt. Elle suit une des approches et une des méthodes de calcul issues du rapport du GIEC *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*, Volume 4 *Agriculture, Forestry and other Land Use*, Chapitre 12 *Harvested wood products* (IPCC, 2019a), et Volume 5 *Waste* (IPCC, 2019b).

3.1. Périmètre d'étude

3.1.1. Approche considérée et frontières du système

Il faut distinguer l'approche et la méthode. Une approche décrit ce qu'il faut considérer en termes d'inventaire des données et de frontière du système dans l'évaluation des émissions et de la capture du CO₂ dans les produits bois, alors que la méthode se concentre sur les techniques et estimations utilisées. Le rapport *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories* référence quatre approches, qui mesurent physiquement soit le changement du stock de carbone, soit les flux de carbone entre les produits bois et l'atmosphère.

L'approche retenue dans cette étude est appelée l'approche production. Elle implique les changements de stock de carbone dans les produits bois qui ont été fabriqués à partir de bois récoltés dans un pays ou sur un territoire. Les produits bois provenant d'une récolte territoriale sont donc ceux consommés dans ce territoire même, mais aussi ceux exportés ailleurs. Un territoire qui applique cette approche pour comptabiliser le stock de carbone de ces produits bois considère donc le bois récolté, et non les produits bois consommés sur son territoire. Cette approche a été choisie pour cette étude car elle est la plus appropriée au regard des questions posées, et le logiciel de comptabilité carbone CAT (*Carbon Accounting Tool*) a justement été développé pour modéliser cette approche (voir paragraphe 3.2.2.). Cependant, le rapport *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories* ne précise pas dans quel pays sont comptabilisés les bois ronds, bois de sciage et autres produits semi-finis de la chaîne de transformation qui sont importés et exportés. L'approche production utilisée par le logiciel CAT et donc dans cette étude prend en compte pour le stock de carbone d'un territoire le bois récolté sur ce territoire et qui sera transformé en produits sur ce même territoire ou à l'étranger : les bois ronds et produits semi-finis exportés sont donc considérés dans la comptabilité carbone du territoire en question. La Figure 11 illustre schématiquement cette approche.

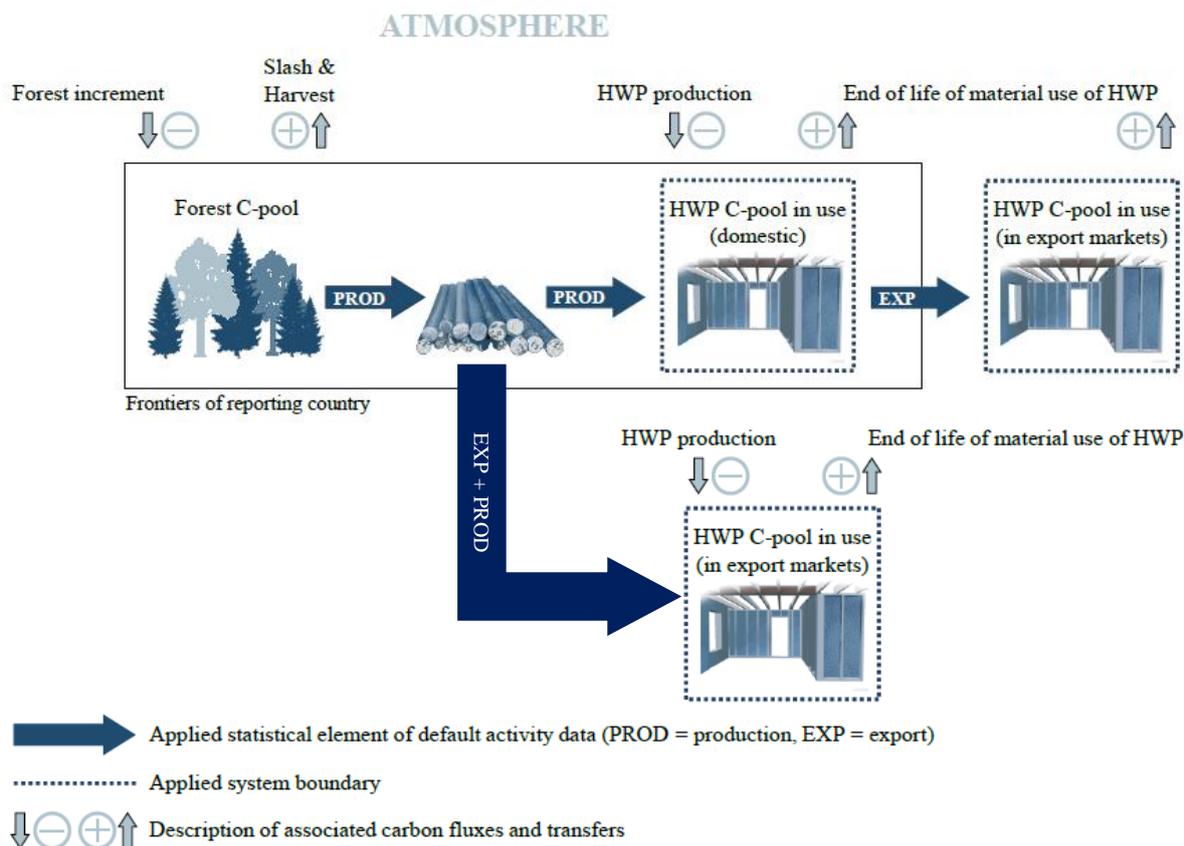


Figure 11: Représentation schématique de l'approche production utilisée dans cette étude.

3.1.2. Scénario de référence et scénarios alternatifs

3.1.2.1. Scénario de référence

Dans cette étude, le stock de carbone dans les produits bois est évalué selon un scénario de référence (SR), qui est celui de la Wallonie pour l'année 2014. Cette étude analyse les peuplements de résineux en Wallonie, et plus particulièrement les essences d'épicéa, de Douglas et de mélèze (qui représentent environ 74% du total des résineux en Wallonie). Selon l'approche production sont donc considérés tous les produits bois fabriqués à partir de bois récolté en Wallonie. Comme il est impossible de suivre le devenir des bois ronds et produits semi-finis exportés, l'hypothèse a été faite que la transformation du bois hors de la Wallonie est la même que celle ayant lieu sur le territoire wallon. La collecte des données concerne donc uniquement la Wallonie, et a permis d'établir les flux du bois (en quantité relative) à travers la chaîne de transformation du bois, de la récolte jusqu'à la fin de vie (voir paragraphe 3.3. pour la collecte des données). Le scénario de référence est représenté sur le diagramme de flux de la Figure 12.

Afin d'évaluer les points clef de la chaîne de transformation, différents paramètres ont été pris en compte dans les scénarios alternatifs (SA) : la durée de vie des produits (SA1), l'influence de l'effet de la mise en décharge (SA2), du réemploi (SA3), du recyclage (SA4), et du bois énergie (SA5).

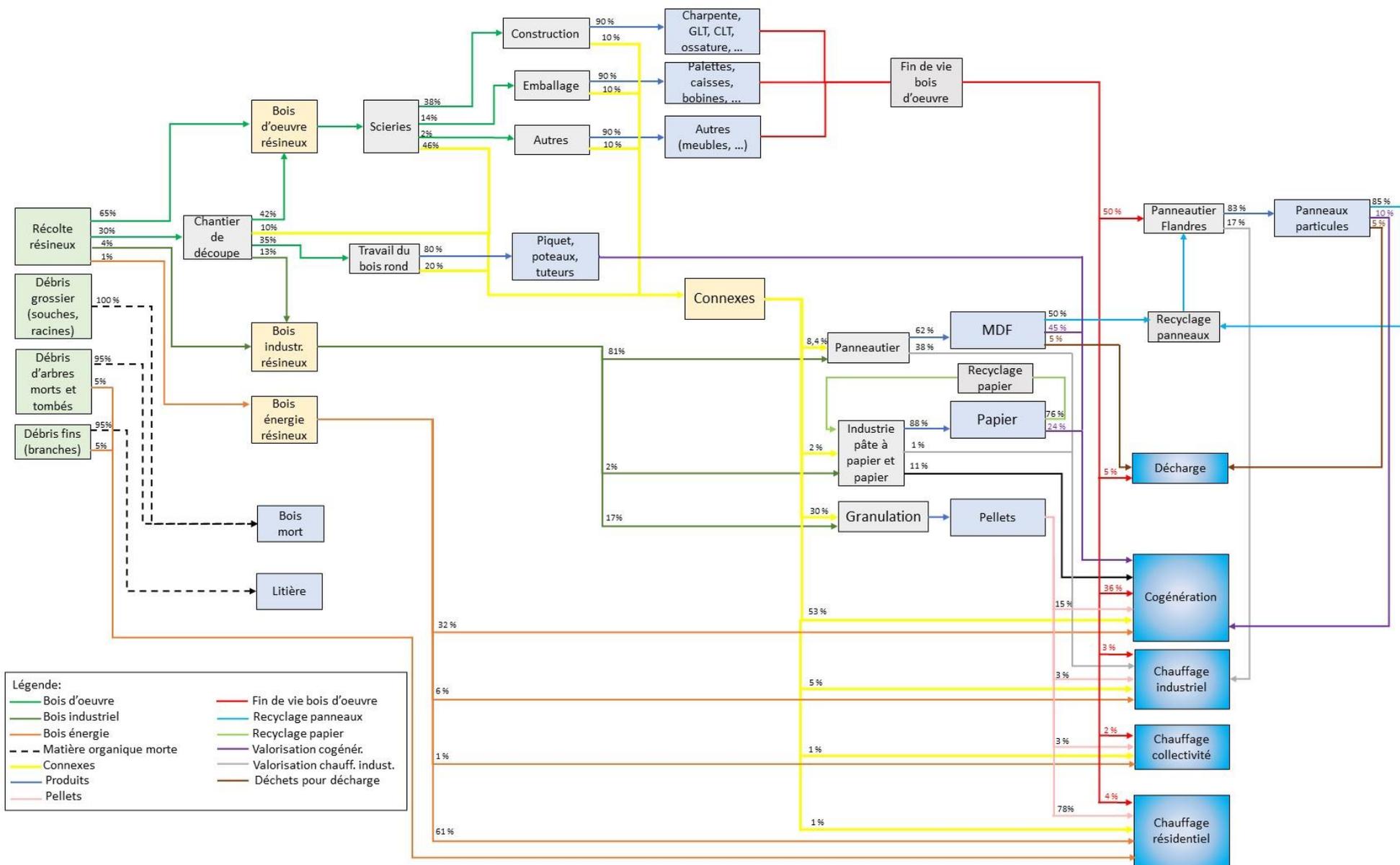


Figure 12: Diagramme de flux de la filière bois en Wallonie, scénario de référence de cette étude

3.1.2.2. Scénario alternatif 1 : Augmentation de la durée de vie des produits

Allonger la durée de vie des produits décale dans le temps les émissions de CO₂ de la fin de vie des produits et donc permet de stocker davantage de carbone dans un système à l'équilibre : ce scénario analyse cette variable. La littérature propose des durées de vie moyennes pour chaque catégorie de produits ajustées en tenant compte de l'obsolescence des produits. L'obsolescence arrive lorsqu'un produit ne peut plus être adapté pour satisfaire à des exigences ou tendances qui évoluent, et concerne les caractéristiques fonctionnelles, technologiques, économiques et esthétiques (IPCC, 2019a). Le produit reste cependant encore utilisable. Le scénario alternatif 1 (SA1) annule alors la notion d'obsolescence pour augmenter la durée de vie des produits par rapport au scénario de référence. De plus, les facteurs de substitution (voir paragraphe 3.2.1.) prennent implicitement en compte la durée de vie durant laquelle un produit se substitue à d'autres. Un produit ayant une durée de vie par exemple 10% plus longue se substituera alors non pas à un, mais à 1,1 autres produits. Il a donc été choisi également pour ce scénario d'augmenter les facteurs de substitution des produits du paragraphe 3.3.5. proportionnellement à l'augmentation de la durée de vie. Le Tableau 2 résume les valeurs de durée de vie des produits. Davantage d'explications sur l'origine de ces valeurs se trouvent au paragraphe 3.3.4..

Tableau 2: Valeurs de la durée de vie des produits dans le scénario de référence et le scénario alternatif 1

Catégorie de produits bois	Durée de vie (année)	
	SR	SA1
Construction	63	70
Emballages	1,8	6
Autres (meubles)	27	45
Piquets, poteaux, tuteurs	15	20
MDF	30,5	46,1
Panneaux particules	30,5	46,1
Papier	1,86	6,5
Bois énergie	1,7	1,7

3.1.2.3. Scénario alternatif 2 : Suppression de la mise en décharge

La mise en décharge (ou centre technique d'enfouissement) est, dans une logique d'économie circulaire, la dernière option possible de traitement en fin de vie, car la matière et l'énergie qu'elle contient sont définitivement perdues. La législation européenne a déjà implémenté des objectifs ambitieux de réduction de la mise en décharge des déchets biodégradables comme le bois (EU, 2008), conséquemment, de nombreux pays ont banni la mise en décharge du bois. Le scénario alternatif 2 (SA2) reflète cet objectif et analyse les conséquences de la suppression de la mise en décharge d'une fraction des produits bois, cette fraction étant redirigée vers le recyclage (SA2a) ou vers l'incinération (SA2b). Le Tableau 3 résume les différents flux de fin de vie des produits bois concernés entre ces scénarios.

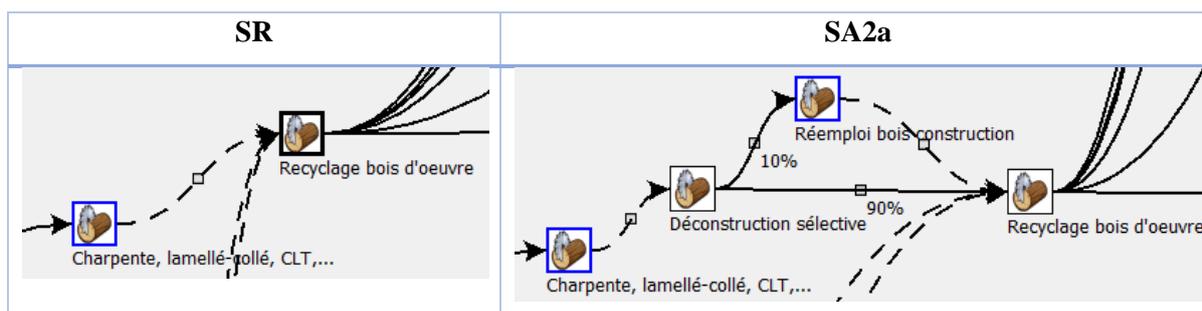
Tableau 3: Valeurs des flux de redirection en fin de vie des produits bois pour le scénario de référence et les scénarios alternatifs 2a et 2b

Fin de vie		SR	SA2a	SA2b
Bois d'oeuvre	Panneautiers	50%	55%	50%
	Cogénération	36%	36%	41%
	Décharge	5%	0%	0%
	Autre fin de vie énergie	9%	9%	9%
MDF	Panneautiers	50%	55%	50%
	Cogénération	45%	45%	50%
	Décharge	5%	0%	0%
Panneaux de particule	Panneautiers	85%	90%	85%
	Cogénération	10%	10%	15%
	Décharge	5%	0%	0%

3.1.2.4. Scénario alternatif 3 : Augmentation du réemploi

Le réemploi des produits bois à la fin de leur première utilisation est la boucle de l'économie circulaire la plus courte. Malgré les incitations de la Commission Européenne, il n'y a actuellement pas d'obligation de réemploi pour des produits comme ceux de la construction, ou de l'ameublement. Il n'existe pas de chiffres officiels sur la quantité de réemploi. Les avantages certains du réemploi se heurtent à des contraintes techniques, normatives et juridiques, ce qui limite son déploiement à grande échelle. Le réemploi est un sujet complexe, c'est pour cela que les professionnels du secteur de RotorDC contactés n'ont pas été en mesure d'estimer la quantité de réemploi maximum possible en respectant ces contraintes. Ce scénario va donc analyser différentes tendances, allant de minimale à ambitieuse : le réemploi des produits bois de la construction et de l'ameublement (panneaux) est fixé à 10% (SA3a), 20% (SA3b) et 30% (SA3c). De plus, il est fait l'hypothèse que l'étape de remise à neuf des produits est négligeable (pas d'émissions fossiles associées sont ajoutées), les produits réemployés ont la même durée de vie et le même facteur de substitution comme s'il s'agissait des produits initiaux. Le Tableau 4 présente les changements de flux entre ces scénarios.

Tableau 4: Illustration des flux de la fin de vie des produits bois de la construction pour le scénario de référence et le scénario 2a. Les flux pour les panneaux MDF et de particules sont construits de la même manière. Les scénarios 2b et 2c sont similaires en changeant le ratio 10%/90% respectivement en 20%/80% et 30%/70% (logiciel CAT)



3.1.2.5. Scénario alternatif 4 : Augmentation du recyclage

La valorisation matière par le recyclage est aussi un des points forts de la stratégie d'économie circulaire de la Commission Européenne. Son Plan d'action pour l'économie circulaire reprend les mesures du package Economie Circulaire (European Parliament, 2018), qui prévoit les objectifs suivants : le recyclage des déchets municipaux doit atteindre 65% en Europe en 2035, et pour les déchets d'emballages, cet objectif est de 70% en 2030. Le scénario alternatif 4 (SA4) ambitionne d'aller plus loin que le scénario de référence en augmentant le taux de recyclage de 20% du bois d'œuvre et des panneaux MDF, et de 5% du papier et des panneaux de particules (car ces produits ont un taux de recyclage déjà très élevé qu'il serait en pratique techniquement difficile de l'augmenter davantage). Cette augmentation du taux de recyclage est compensée par une baisse proportionnelle des autres types de fin de vie. Le Tableau 5 résume les différents flux de fin de vie des produits bois concernés.

Tableau 5: Valeurs des flux de fin de vie des produits bois pour le scénario de référence et le scénarios 4

Fin de vie		SR	SA4
Bois d'oeuvre	Panneautiers	50%	70%
	Cogénération	36%	22%
	Décharge	5%	3%
	Autre fin de vie énergie	9%	5%
MDF	Panneautiers	50%	70%
	Cogénération	45%	27%
	Décharge	5%	3%
Panneaux de particule	Panneautiers	85%	90%
	Cogénération	10%	7%
	Décharge	5%	3%
Papier	Industrie de la pâte à papier et du papier	76%	81%
	Cogénération	24%	19%

3.1.2.6. Scénario alternatif 5: Influence du bois énergie

D'un côté, le bois énergie permet de produire de la chaleur, et de l'électricité dans le cas de la cogénération, en émettant dans l'atmosphère du carbone originaire de la biomasse, et en se substituant à d'autres sources de chaleur et d'électricité d'origine fossile. D'un autre côté, la matière est définitivement perdue par combustion, il n'est plus possible de recycler le bois en d'autres produits qui allongeraient la durée du stockage carbone dans ces produits et se substitueraient à d'autres produits plus énergivores. Parmi ces deux aspects de l'utilisation ou non du bois énergie, il est difficile de savoir lequel est le plus avantageux pour l'atténuation du changement climatique. Ce scénario alternatif 5 (SA5) analyse les deux aspects : le scénario 5a (SA5a) prévoit moins de bois énergie pour pouvoir réaliser plus de produits bois, en éliminant la production de pellets et de bois énergie à partir du bois récolté et en ne conservant que le bois énergie post-production et post-consommation (ceci est la ligne directrice de la Stratégie Nationale Bas Carbone de la France, voir

paragraphe 2.1.4.). A l'inverse, le scénario 5b (SA5b) prévoit plus de bois énergie en augmentant la production de bois énergie à partir de la récolte et de la granulation (au détriment d'une partie du bois industriel), et en conservant le bois énergie post-production et post-consommation. Le Tableau 6 résume les différents flux de la récolte de résineux et du bois industriel pour ces scénarios.

Tableau 6: Valeurs des flux de la récolte de résineux et du bois industriel pour le scénario de référence et les scénarios 5a et 5b

Catégorie bois	Output	SR	SA5a	SA5b
Récolte résineux	Bois industriel	4%	5%	3%
	Bois énergie	1%	0%	2%
Bois industriel	Panneautier	81%	98%	68%
	Papier	2%	2%	2%
	Granulation	17%	0%	30%

3.2. Matériels et méthode

3.2.1. Méthode utilisée pour évaluer le stock de carbone dans les produits bois

Cette étude se concentre sur la comptabilité carbone dans les produits bois en Wallonie et sa variation en fonction des changements d'usage. Le stock de carbone dans la biomasse vivante et dans le sol n'est pas analysé, et est constant pour chaque scénario car le type de sylviculture est le même (voir paragraphe 3.3.1.). Le stock de carbone dans les produits bois est estimé en considérant les flux et stocks suivants :

- Le puits de carbone des produits bois en utilisation et déposés en décharge
- Les émissions de méthane issus de la décomposition des produits bois en décharge
- Les émissions fossiles de la transformation des produits bois
- La substitution matérielle et énergétique des produits bois

L'évaluation du puits de carbone des produits bois définit ses frontières selon l'approche production des 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories (voir paragraphe 3.1.1.). La méthode de calcul suit fortement la méthode par défaut présentée dans ce rapport, appelée Tier 1. Cette méthode est à utiliser lorsqu'il n'existe pas de méthode et de données d'activité et/ou de facteurs d'émission spécifiques au pays ou territoire étudié. La méthode Tier 1 est une décroissance du premier ordre. Les équations suivantes permettent de comprendre comment sont estimés les émissions et la séquestration de CO₂ provenant des produits bois en usage (IPCC, 2019a).

$$\Delta CO_{2\ TOTAL}(i) = \frac{-44}{12} \cdot \sum_{l=1}^n \Delta C_l(i)$$

$$\Delta C_l(i) = C_l(i+1) - C_l(i)$$

$$C_l(i+1) = e^{-k} \cdot C_l(i) + \left[\frac{(1 - e^{-k})}{k} \right] \cdot Inflow_l(i) \quad \text{where } k = \frac{\ln(2)}{HL}$$

$\Delta CO_{2\ TOTAL}(i)$: total des émissions et séquestration de CO₂ du changement net du stock de carbone dans les produits bois durant l'année i (en MtCO₂)

$\Delta C_l(i)$: changement dans le stock de carbone de la classe de produit bois l durant l'année i (en MtC.an⁻¹)

n : nombre de classes de produits bois sélectionnées

$C_l(i)$: stock de carbone dans la classe de produit bois l au début de l'année i (en MtC)

k : constante de décroissance de chaque classe de produit bois (en an⁻¹)

HL : demi-vie de la classe de produit bois l. Les valeurs par défaut de la méthode Tier 1 sont : 2 ans pour le papier et carton, 25 ans pour les panneaux et 35 ans pour le bois d'œuvre

$Inflow_l(i)$: flux entrant de carbone dans la classe de produit l durant l'année i (en MtC.an⁻¹)⁶

Les produits bois déposés en décharge constituent aussi un puits de carbone, qui est également une décroissante du premier ordre selon la méthode Tier 1 (IPCC, 2019b). Dans cette étude, la fraction de carbone organique dégradable a été choisi à 0,4, ce qui est légèrement inférieur à la valeur par défaut de la méthode Tier 1, qui est de 0,5, car des auteurs ont estimé que cette valeur est surestimée (Pichancourt J.-B., 2018). La constante de décroissance par défaut est celle de la méthode Tier 1 pour un climat tempéré en conditions humides : $k = 0,03$, c'est-à-dire, durée de vie de 33 ans. Le carbone de la partie non-dégradable des produits bois s'accumule et constitue un puits localisé dans les décharges, tandis que la partie dégradable est décomposée par les micro-organismes pour être transformée en méthane et CO₂ (voir paragraphe 2.2.3.3.). Dans des conditions anaérobiques, environ la moitié des biogaz produits est du méthane, ce qui correspond à la méthode Tier 1, et en conditions semi-aérobiques, cette proportion se réduit. Par manque d'information sur les conditions de gestion des centre d'enfouissement wallons, et pour adopter une démarche conservatrice, il a été choisi pour cette étude une décomposition semi-aérobique des produits bois en décharge.

⁶ Pour la description complète des équations de $Inflow_l(i)$, voir (IPCC, 2019a p. 12.23)

Les émissions fossiles de la transformation du bois dans l'industrie sont également comptabilisées, puisque ces émissions sont associées à l'existence-même de ces produits. Pour chaque catégorie de produits, les émissions en CO₂eq par unité fonctionnelle sont renseignées.

Les produits bois se substituent à d'autres produits (matériels et énergétiques) ayant des émissions fossiles souvent plus importantes durant leur cycle de vie. Des émissions fossiles sont donc évitées en utilisant des produits bois plutôt que d'autres : ce bénéfice est également comptabilisée dans cette méthode. L'effet de substitution se détermine en multipliant la quantité de bois par un facteur de substitution (SF) : ce facteur quantifie les émissions de gaz à effet de serre évitées en utilisant un produit bois à la place d'un autre produit ayant la même fonction (matérielle ou énergétique). L'équation empirique est la suivante (Leskinen P., 2018) :

$$SF = \frac{GHG_{non-wood} - GHG_{wood}}{WU_{wood} - WU_{non-wood}}$$

$GHG_{non-wood}$; GHG_{wood} : émissions de gaz à effet de serre respectivement d'un produit non-bois et d'un produit bois

WU_{wood} ; $WU_{non-wood}$: quantité de bois utilisée respectivement dans le produit bois et le produit non-bois

Si le facteur de substitution est positif, cela indique que la fabrication et l'utilisation du produit bois émettent moins de gaz à effet de serre que l'alternative au produit bois. La quantification des facteurs de substitution est néanmoins loin d'être simple et évidente, la littérature propose de nombreuses valeurs différentes avec de grandes incertitudes. En effet, l'effet de substitution dépend de différents facteurs, comme le type de produit bois, le type de produit alternatif, l'usage et la fin de vie, ainsi que l'utilisation de résidus bois ou connexes (Leskinen P., 2018).

Dans cette étude, les émissions fossiles de la transformation du bois sont évaluées pour chaque scénario analysé individuellement, mais pas l'effet de substitution. En effet, évaluer les bénéfices de la substitution des produits bois d'un scénario analysé individuellement reviendrait à le comparer avec une situation fictive où il n'y aurait pas de produits bois, donc pas de gestion forestière, ce qui est un non-sens. La substitution est estimée en comparant deux scénarios de cette étude (le scénario de référence et un scénario alternatif), afin de déterminer quel scénario a l'effet de substitution le plus important. Comme les facteurs de substitution prennent déjà en compte les émissions fossiles du cycle de vie, alors une comparaison de deux scénarios ne présente pas les résultats des émissions fossiles, pour éviter un double comptage des émissions fossiles.

3.2.2. Logiciel CAT (*Carbon Accounting Tool*)

De nombreux outils pour l'évaluation des stocks et flux dans les produits bois ont été développés et comparés entre eux (Brunet-Navarro P., 2016). Cette étude utilise le logiciel CAT⁷ (Pichancourt J.-B., 2018) (Fortin M., 2012), développé par l'unité de recherche Silva de l'Institut Nationale de la Recherche Agronomique (INRA) de Nancy et soutenu par l'Agence de l'Environnement et de la Maitrise de l'Energie (ADEME), l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) et l'Office National des Forêts (ONF). D'après Brunet-Navarro et al., le logiciel CAT est l'un des outils les plus complets pour la comptabilité carbone, réunissant 12 des 13 critères de la comparaison. La spécificité de ce logiciel est son interface simple d'utilisation qui permet de représenter et d'analyser des cycles de vie complexes le long de la chaîne d'approvisionnement du bois (comme le diagramme de flux du scénario de référence, Figure 12). Un diagramme de flux se modélise sur CAT selon le schéma de la Figure 13.

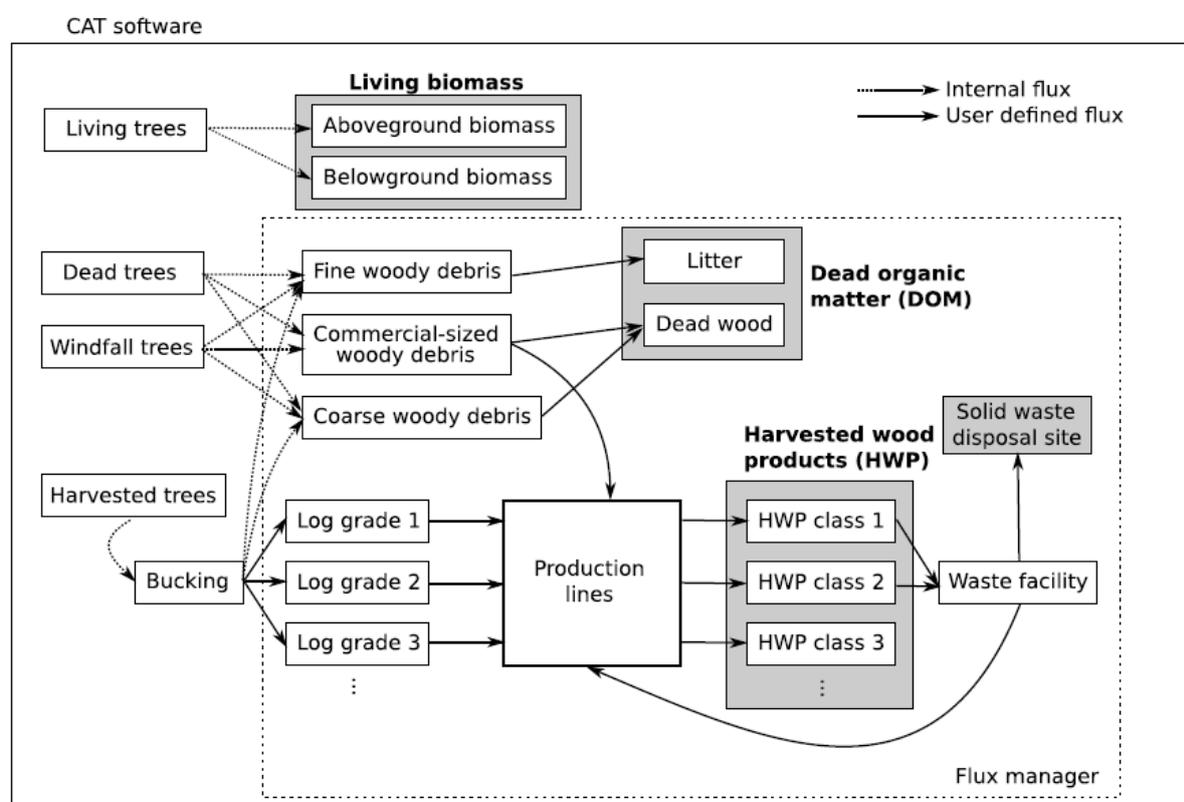


Figure 13: Composantes du diagramme de flux de l'interface CAT. Les boîtes grisées sont les puits de carbone. Source : (Pichancourt J.-B., 2018)

Les puits de carbone suivants sont considérés dans CAT (Pichancourt J.-B., 2018) :

- La biomasse vivante : les arbres sont convertis en quantité de carbone selon la méthode Tier 1 (IPCC, 2019a). CAT utilise les valeurs par défaut des densités, des facteurs d'expansion de la biomasse et des fractions de carbone de cette méthode. Dans le cadre de cette étude, la biomasse vivante ne varie pas entre les scénarios étudiés.

⁷ Disponible en accès libre: <https://sourceforge.net/p/lerfobforesttools/wiki/CAT/>

- La matière organique morte : elle est composée d'arbres morts et de résidus de bois qui, selon leur taille, complètent le puits de carbone de la litière forestière ou de bois mort. Le stock de carbone dans ce puits suit également une décroissance de premier ordre. CAT utilise les données de la méta-analyse de Zell et al. : un taux de décroissance k de $0,031 \text{ an}^{-1}$ et une durée de vie moyenne de 32 ans pour le bois mort, $0,178 \text{ an}^{-1}$ et 5,6 ans pour la litière (Zell J., 2009). Tout comme la biomasse vivante, la matière organique morte n'est pas analysée dans cette étude.
- Les produits bois en utilisation et déposés en décharge : CAT utilise l'approche production (paragraphe 3.1.1.) et la méthode longuement décrite dans le paragraphe 3.2.1.. Pour chaque classe de produits, des données spécifiques doivent être inventoriées : durée de vie moyenne, facteur de substitution, émissions de gaz à effet de serre fossile (voir collecte des données au paragraphe 3.3.).

De plus, CAT permet de réaliser une analyse d'incertitude suivant la méthode de Monte-Carlo (Pichancourt J.-B., 2018), selon une distribution gaussienne ou uniforme. L'incertitude provient de l'estimation de différents paramètres ainsi que du modèle et de son échantillonnage. CAT permet de définir l'incertitude pour cinq catégories de paramètres : les facteurs d'expansion de la biomasse, les densités des essences de bois, les fractions de carbone, les durées de vie moyennes et les facteurs de substitution. L'intervalle de confiance a été choisi à 0,95.

3.2.3. Plateforme CAPSIS (*Computer-Aided Projection of Strategies In Silviculture*)

CAT a été développée dans le cadre d'une initiative plus large de la plateforme CAPSIS⁸. Cette plateforme permet de réaliser des simulations de croissance forestière. Des modèles sylvicoles sont développés en fonction d'une large quantité de paramètres sylvicoles. Ainsi, pour avoir les données de la biomasse forestière et les récoltes d'arbres nécessaires pour modéliser le cycle de vie des produits bois, CAT requiert un modèle de croissance forestière provenant de la plateforme CAPSIS. Dans cette étude a été utilisé le modèle de croissance appelé GYMNOS. GYMNOS a été développé par Ligot et al. de l'université Gembloux Agro-Bio Tech (Périn J., 2016a). Ce modèle modélise la foresterie actuelle des peuplements de Douglas, d'épicéa et de mélèzes en Wallonie et permet d'anticiper l'évolution d'un peuplement théorique de densité initiale connue et suivant un schéma sylvicole donné. Or, un aménagement sylvicole à l'échelle du peuplement (superficie réduite) est différent d'un aménagement à l'échelle du paysage ou du territoire (superficie large) qui possède des discontinuités du couvert forestier. La production de bois à l'échelle du peuplement est donc surestimée. GYMNOS tient compte de cette surestimation en diminuant de 10% la production réelle de bois par rapport à la production

⁸ Disponible en accès libre: <https://capsis.cirad.fr/capsis/home>

théorique (Périn J., 2016a). Plus d'information sur le schéma sylvicole utilisé dans cette étude se trouvent au paragraphe 3.3.1..

3.3. Collecte des données

La collecte des données concerne la sylviculture réalisée pour les essences étudiées, les flux de bois entre les différentes industries de transformation du bois en Wallonie jusqu'à la fin de vie, les émissions fossiles associées, la durée moyenne d'utilisation et les facteurs de substitution des produits. L'année de référence de 2014 a été choisie car de nombreuses données sont disponibles pour cette année-là. Il était aussi pertinent de ne pas choisir une année trop récente car la crise des scolytes à partir de 2018 et la crise sanitaire liée à la Covid-19 ont beaucoup affecté la production de la filière bois (qui n'est à l'heure actuelle toujours pas revenu à son état d'avant crises).

3.3.1. Type de sylviculture

Le logiciel CAPSIS utilise le modèle de croissance GYMNOS, comme expliqué au paragraphe 3.2.3.. Ce modèle de croissance nécessite l'introduction de différentes données sylvicoles pour pouvoir modéliser la croissance des peuplements : le nombre d'arbres plantés par hectare, la durée d'exploitation, la fréquence des éclaircies⁹, le nombre d'arbres prélevés par éclaircie, etc. Pour garantir une sylviculture moyenne et adaptée à la Wallonie, cette étude utilise comme données les nouvelles normes sylvicoles des peuplements d'épicéa et de Douglas conçus pour la gestion de la forêt publique en Wallonie (Périn J., 2016b). Ces normes sylvicoles se présentent sous forme de table de production pour les différentes essences, classes de productivité et densité de plantation. Suite au conseil de Gauthier Ligot, développeur du modèle de croissance GYMNOS, la table de production choisie pour cette étude est celle de l'épicéa, de classe de productivité 2 et de densité de plantation de 2,5m x 2m. Les données de cette table de production ont été entrées dans CAPSIS pour le modèle GYMNOS, il s'agit notamment de planter 2500 arbres par hectares, d'une durée d'exploitation de 88 ans et des éclaircies tous les 6 ans à partir de 22 ans. L'Annexe 1 présente la table de production utilisée.

3.3.2. Flux de transformation du bois en Wallonie

Les données des flux de transformation ont été inventoriées pour correspondre le plus possible au territoire wallon (l'hypothèse a été faite que les bois ronds et les produits semi-finis exportés suivront la même transformation qu'en Wallonie). Cependant, parmi les données disponibles de la filière bois en Wallonie (organismes publics ou professionnels de l'industrie), le bois récolté en Wallonie n'est pas toujours spécifiquement suivi et quantifié, mais il est inclus dans la totalité du bois consommé par

⁹ Une éclaircie est une coupe sélective visant à réduire le nombre d'arbres d'une parcelle pour favoriser la croissance individuelle des meilleurs arbres. Les arbres coupés deviennent généralement des produits marchands.

chaque industrie (importations incluses). Ce problème est en réalité minime, car l'avantage de CAT est d'avoir besoin de données relatives des flux de sortie de chaque étape (en pourcentage, voir diagramme de flux de la Figure 12). L'hypothèse faite dans cette étude est que la transformation du bois wallon au sein d'une industrie est la même que la transformation de la totalité du bois. Les données ainsi que leurs sources sont présentées dans l'Annexe 2.

3.3.3. Catégories des grumes

Les données des arbres récoltés modélisés par GYMNOS et envoyées dans CAT sont de différents diamètres en fonction de l'âge auquel ils ont été récoltés. Le diamètre des arbres à hauteur de poitrine définit leur catégorie (bois énergie, bois industriel et bois d'œuvre), et donc la transformation du bois qu'ils vont suivre. CAT nécessite les données de l'industrie pour répartir les arbres récoltés entre ces trois catégories. Ces données n'ont pas pu être trouvées pour les résineux en Belgique, la réponse d'un professionnel du secteur était qu'il est trop complexe de catégoriser les grumes uniquement en fonction de leur diamètre. Une estimation a donc été faite, sur base des connaissances d'un expert de la filière bois belge, et des valeurs trouvées pour le chêne en France. Pour chaque catégorie de grumes doit aussi être précisé le volume commercial, qui correspond à la proportion de l'arbre coupé qui peut réellement être exploitée dans la filière bois. La proportion non exploitée est constituée des branches qui sont laissées dans la forêt (litière). Une petite part de ces débris est récoltée directement par les particuliers pour le chauffage résidentiel. Ces données sont présentées dans l'Annexe 3.

3.3.4. Durée de vie moyenne des produits bois

La durée de vie moyenne des produits bois doit être définie dans CAT pour chaque classe de produits. Les valeurs du rapport du GIEC 2006 *IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories* ont été utilisées (IPCC, 2019a) pour les classes de produits hors bois énergie. Ce rapport définit pour chaque classe de bois la durée de vie nationale estimée et un facteur d'obsolescence, ce qui permet de calculer la durée de vie ajustée. Cette durée de vie ajustée est utilisée pour le scénario de référence et les scénarios alternatifs, sauf le scénario 1 qui utilise la durée de vie estimée (voir paragraphe 3.1.2.2.). Ces données sont disponibles dans l'Annexe 4.

3.3.5. Facteurs de substitution

Définir des facteurs de substitution pour une classe de produits bois est extrêmement complexe tant il y a de paramètres qui rentrent en compte. Les variations de valeurs sont grandes dans la littérature et les facteurs de substitution feront l'objet dans cette étude d'une analyse de sensibilité (voir paragraphe 3.5.2.). Les facteurs de substitution choisis dans cette étude sont ceux utilisés par Pichancourt et al. dans leur analyse avec le logiciel CAT de la biomasse et des produits bois en Lorraine (Pichancourt J.-B., 2018). Ces facteurs de substitution viennent eux-mêmes de Norvège et de Suède selon l'étude de

Petersen et al. (Petersen A.-K., 2005) et sont parmi les plus petits facteurs de substitution de la littérature. Les facteurs de substitution sont toujours associés à une unité fonctionnelle du produit pour définir la quantité de produits bois à substituer. Ils sont présentés dans l'Annexe 5.

3.3.6. Emissions fossiles de la transformation des produits bois

Les émissions fossiles provenant des machines et du transport le long de la chaîne de transformation du bois (de la récolte à la sortie d'usine) sont renseignées pour chaque classe de produit. Tout comme les facteurs de substitution, les émissions fossiles sont associées à une unité fonctionnelle du produit considéré. Leur évaluation a été la suivante : le projet ENECOBOIS a réalisé en 2014 une série d'analyses de cycle de vie de différents produits bois pour la construction en Wallonie. Lorsque les données d'inventaire de l'analyse de cycle de vie correspondaient à du bois récolté en Wallonie, les résultats des émissions de la fabrication du produit ont été reprises sans modification. Dans certains cas, le bois provenait de l'étranger. Une analyse de cycle de vie similaire a été réalisée sur le logiciel SimaPro (Pré Consultants, Amersfoort, Pays-Bas) en reprenant les données d'inventaire du projet ENECOBOIS et en adaptant le transport du bois au contexte de la Wallonie. Pour les produits bois hors construction, la base de données ecoinvent 3.8 (ecoinvent, Zurich, Suisse) a été utilisée pour calculer sur le logiciel SimaPro les émissions fossiles de la fabrication de ces produits. Les valeurs utilisées dans cette étude sont rassemblées dans l'Annexe 6.

3.3.7. Incertitude des différents paramètres

Pour les paramètres pour lequel le logiciel CAT peut analyser l'incertitude, les marges d'erreur et la distribution des valeurs doivent être renseignées. Les valeurs des marges d'erreur sont inspirées de l'étude de Pichancourt et al. de la biomasse et les produits bois en Lorraine avec le logiciel CAT (Pichancourt J.-B., 2018). Les valeurs des marges d'erreur utilisées dans l'étude sont présentées dans le Tableau 7. La distribution des marges d'erreur est gaussienne, et 50 répétitions ont été réalisées pour chaque analyse selon la méthode de Monte Carlo.

Tableau 7: Incertitude des différents paramètres pour le calcul de la comptabilité carbone

Paramètre	Marge d'erreur
Facteurs d'expansion de la biomasse	7%
Densités du bois	10%
Fractions de carbone	2%
Durée de vie des produits bois	25%
Facteurs de substitution	25%

3.4. Résultats et interprétation

Cette partie consiste à évaluer le stock de carbone dans les produits bois en Wallonie et dans le cas des scénarios alternatifs grâce aux données du paragraphe 3.3. et à la combinaison de la plateforme CAPSIS et du logiciel CAT. Le stock de carbone dans la biomasse forestière est aussi évaluée, mais comme la sylviculture est la même dans tous les scénarios, les résultats sont identiques et ne seront que très peu commentés. En effet, le but de l'étude est d'analyser différents scénarios d'usage des produits bois, et non différents types de sylviculture.

Selon la méthode utilisée par le logiciel CAT et décrite au paragraphe 3.2.1., les résultats des stocks et flux de carbone selon les différents compartiments sont les suivants :

- Le stock de carbone dans la biomasse vivante des forêts, subdivisée entre la biomasse souterraine et aérienne, en tCO₂eq/ha.
- Le stock de carbone dans la matière organique morte que composent la litière forestière et le bois mort, en tCO₂eq/ha.
- Le stock de carbone dans les produits bois, subdivisé entre les produits en utilisation et ceux déposés en décharge, en tCO₂eq/ha.
- Le flux des émissions fossiles de la transformation des produits (lorsqu'un scénario est analysé individuellement) ou de la substitution matérielle et énergétique (lorsque plusieurs scénarios sont comparés), en tCO₂eq/ha/an.
- Le flux de carbone provenant de la partie non dégradable des déchets bois décomposés en décharge et qui alimente le stock de carbone en décharge, en tCO₂eq/ha/an.
- Le flux des émissions de méthane provenant de la partie dégradable des déchets bois décomposés en décharge, en tCO₂eq/ha/an.

3.4.1. Stocks et flux de carbone du scénario de référence

Selon le modèle de croissance sylvicole GYMNOS (modèle à l'échelle du peuplement), CAT présente l'évolution des stocks et des flux cumulés de carbone dans le temps d'une parcelle d'un hectare (Annexe 7), ainsi que les stocks et flux de carbone moyens durant la durée d'exploitation de la parcelle qui est de 88 ans (Figure 14). Comme indiqué plus haut, la biomasse vivante, la matière organique morte et les produits bois sont des stocks tandis que les émissions fossiles, le carbone non-dégradable et les émissions de méthane en décharge sont des flux annuels. Les stocks moyens de carbone pendant la durée d'exploitation de la parcelle de la Figure 14 correspondent donc à l'intégrale de leur courbe respective de la Figure 21 (Annexe 7), tandis que les flux moyens de carbone de la Figure 14 correspondent à la moyenne des flux cumulés pour la durée d'exploitation de 88 ans.

En estimant que le même type de sylviculture est réalisé sur toutes les parcelles de résineux en Wallonie et que l'exploitation des parcelles est équitablement échelonné dans le temps, les valeurs de la Figure 14 correspondent donc aux stocks moyens à l'équilibre de carbone dans la biomasse, la matière

organique morte et les produits bois par hectare. Ces stocks représentent au total 825 tCO₂eq/ha. Les flux sont quant à eux générés chaque année. Le flux de carbone non-dégradable alimente le stock de carbone en décharge, et est donc séquestré de façon permanente, tandis que les émissions fossiles et de méthane sont émis dans l'atmosphère. Ces deux derniers représentent au total 1,76 tCO₂eq/ha/an. Si ce scénario est reproduit à l'infini, cela signifierait que les émissions fossiles et de méthane cumulées seraient supérieures que le stock de carbone à l'équilibre dans la biomasse, la matière organique morte et les produits bois au bout de 468 ans. En prenant en compte l'incertitude des données dont les intervalles de confiance sont présentés dans la Figure 14, cette durée varie entre 252 ans et 861 ans. Cet écart important prouve la grande variabilité et difficulté dans l'estimation des stocks de carbone dans la biomasse et les produits bois, néanmoins il ne change pas l'interprétation.

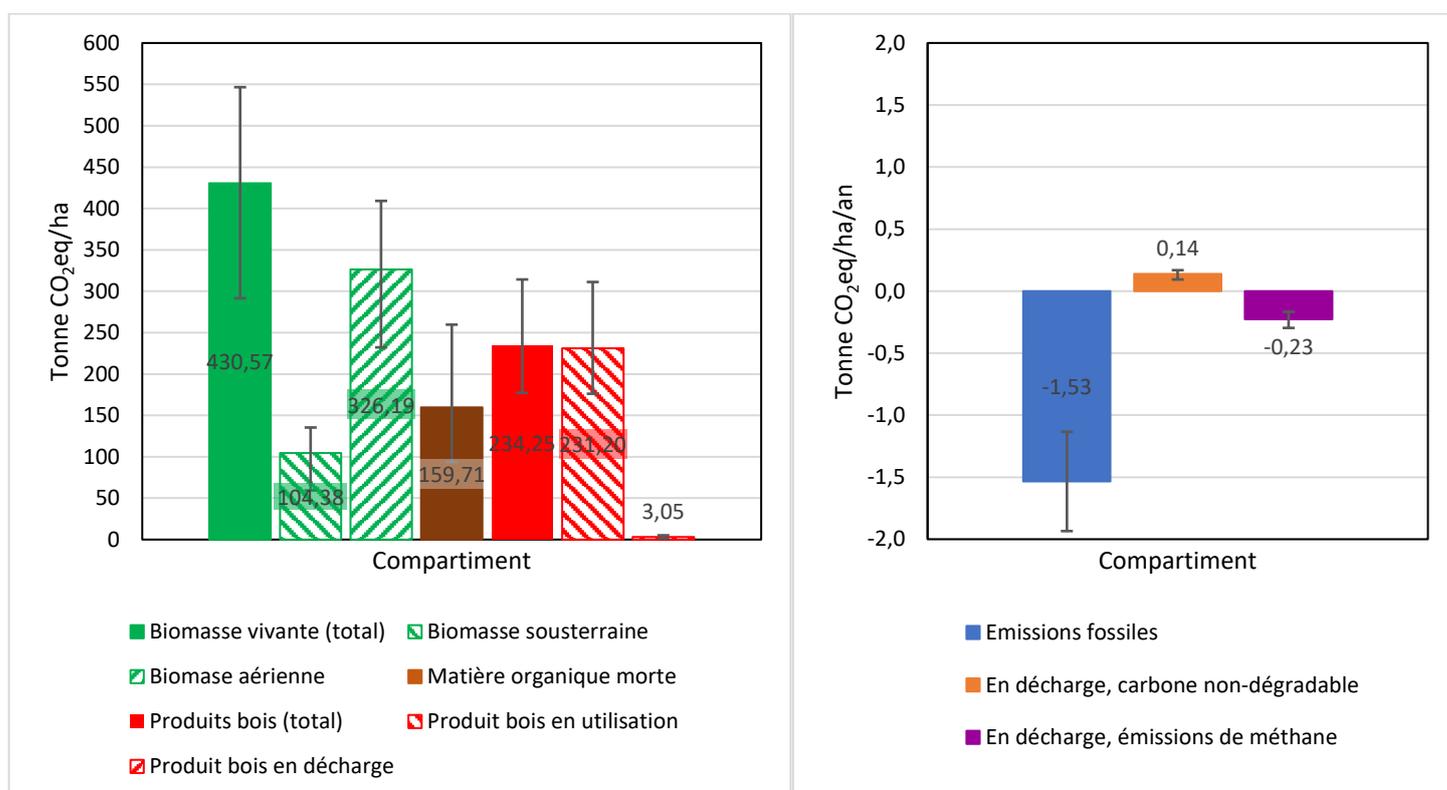


Figure 14: Stocks (à gauche) et flux annuels (à droite) moyens de carbone durant la durée d'exploitation d'une parcelle d'un hectare. Un flux négatif correspond à une émission vers l'atmosphère, et un flux positif à un transfert vers un puits de carbone

La forêt et les produits bois ont cette capacité à subvenir aux besoins des hommes tout en retardant les émissions nettes de gaz à effets de serre, ce qu'aucun autre matériau d'origine minérale ou fossile n'est en mesure d'apporter. Mais il faut relativiser cet avantage, car face à l'urgence climatique, il n'est pas permis de léguer aux générations futures une dette carbone. Pour que la forêt et les produits bois aient effectivement un impact sur le changement climatique proche de zéro, les émissions fossiles de la transformation du bois et de méthane de la dégradation du bois devraient être compensées, par l'augmentation du couvert forestier par exemple, ou par divers changements d'usage des produits bois, ce qui sera analysé dans les paragraphes suivants.

3.4.2. Impact des scénarios alternatifs sur les stocks et les flux de carbone

La différence de stocks et de flux de carbone entre les scénarios alternatifs et le scénario de référence est présentée dans la Figure 15.

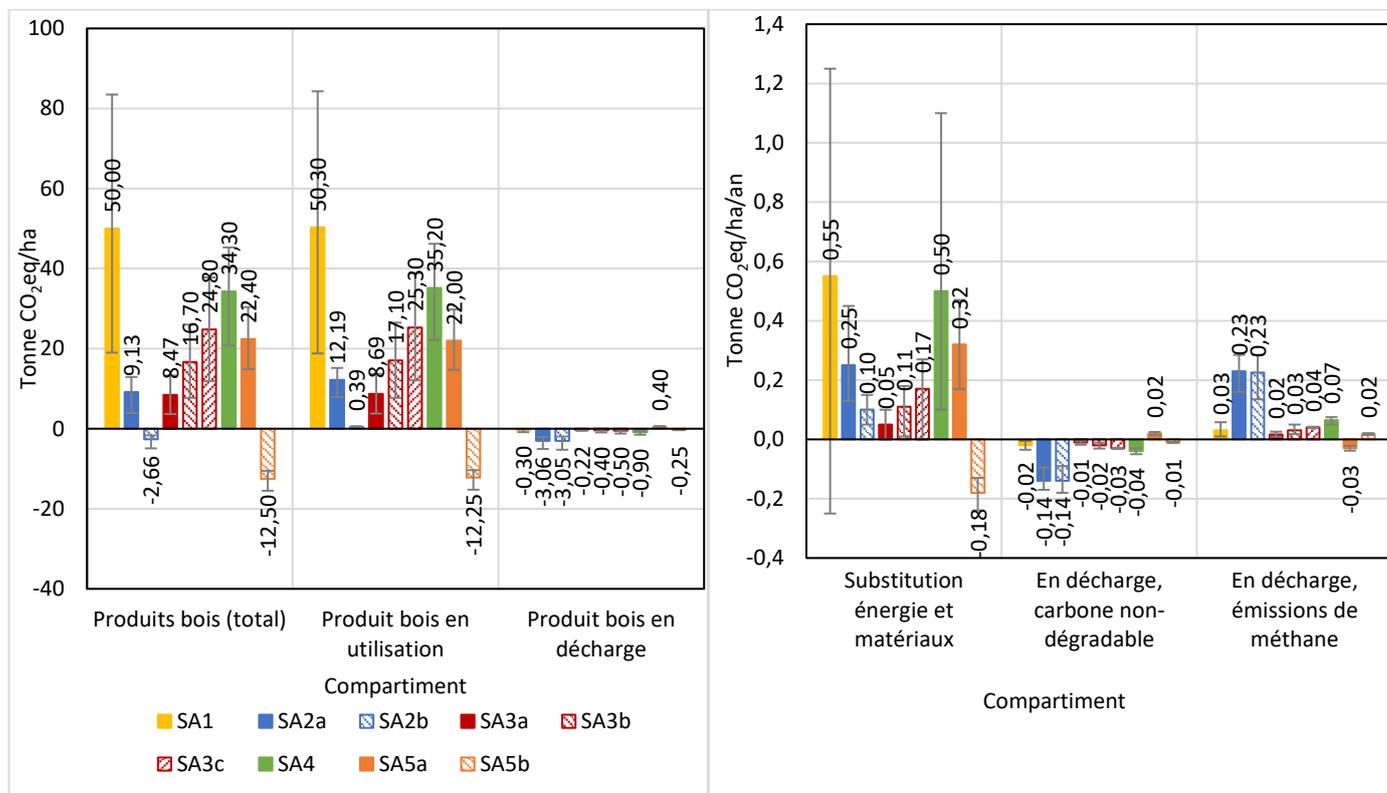


Figure 15: Différence des stocks de carbone (à gauche) et des flux de carbone (à droite) entre les scénarios alternatifs et le scénario de référence, moyenne à l'équilibre. Les flux positifs de substitution et d'émissions de méthane correspondent respectivement aux émissions fossiles de la transformation et aux émissions de méthane évitées par rapport au scénario de référence.

SA1 : allongement de la durée de vie des produits

SA2 : suppression de la mise en décharge, redirigée vers le recyclage (2a) et vers l'incinération (2b)

SA3 : augmentation du réemploi des produits de la construction et des panneaux de 10% (3a), 20% (3b), 30% (3c)

SA4 : augmentation du recyclage du bois d'œuvre et du MDF de 20%, des panneaux de particules et du papier de 5%

SA5 : moins de bois énergie et plus de bois industriel (5a), plus de bois énergie et moins de bois industriel (5b)

L'allongement de la durée de vie des produits (scénario 1) permet de considérablement augmenter le stock de carbone dans les produits bois (+50 tCO₂eq/ha) ainsi que l'effet de substitution d'autres produits (+0,55 tCO₂eq/ha/an) par rapport au scénario de référence. En effet, un produit bois qui dure plus longtemps que sa durée de vie moyenne permet de substituer plus d'un autre produit.

Le même constat est fait pour le réemploi et le recyclage d'une partie des produits bois (scénarios 3a, 3b, 3c et 4). La série des scénarios 3 présente un stock total de carbone dans les produits bois (+8,47 ; +16,70 ; +24,80 tCO₂eq/ha) qui augmente proportionnellement à l'augmentation du réemploi (10%, 20% et 30%), cette proportionnalité se retrouve dans les émissions évitées de méthane en décharge (+0,02 ; +0,03 ; +0,04 tCO₂eq/ha/an), mais ce n'est plus le cas pour l'effet de substitution (+0,05 ;

+0,11 ; +0,17 tCO₂eq/ha/an). Le scénario 4 obtient des valeurs importantes de stock de carbone dans les produits bois (+34,30 tCO₂eq/ha) et de substitution (+0,50 tCO₂eq/ha/an).

La suppression de la mise en décharge (scénarios 2a et 2b) permet d'annuler les émissions de méthane en décharge par rapport au scénario de référence (+0,23 tCO₂eq/ha/an) mais annule aussi le flux de carbone non-dégradable en décharge (-0,14 tCO₂eq/ha/an) et le stock de carbone séquestré en décharge (-3,05 tCO₂eq/ha). L'effet de substitution des produits bois généré par le recyclage (scénario 2a) est 2,5 fois plus importante que celui généré par l'incinération (scénario 2b). De plus, le recyclage augmente le stock de carbone dans les produits bois de 9,13 tCO₂eq/ha car une plus grande quantité de produits est en utilisation, alors que l'incinération le diminue légèrement de 2,66 tCO₂eq/ha.

La redirection de la récolte de bois initialement prévue pour l'énergie vers le bois industriel (scénario 5a) augmente significativement le stock de carbone dans les produits bois (+22,4 tCO₂eq/ha) et légèrement en décharge (+0,4 tCO₂eq/ha), et aussi l'effet de substitution de ces nouveaux produits (+0,32 tCO₂eq/ha/an). A l'inverse, la diminution du volume de bois disponible pour le bois industriel au bénéfice du bois énergie (scénario 5b) résulte en une diminution du stock de carbone dans les produits bois (-12,5 tCO₂eq/ha) et de la substitution (-0,18 tCO₂eq/ha/an).

La différence des émissions de méthane avec la référence est positive pour tous les scénarios à l'exception du 5a car le flux de méthane du scénario de référence est de -0,23 tCO₂eq/ha/an. Ces scénarios alternatifs produisent donc moins d'émissions de méthane que le scénario de référence car la même quantité de produits bois est produite (voir la distribution des produits bois au paragraphe 3.4.3.) et ils permettent de décaler dans le temps la mise en décharge des produits bois (voir de l'annuler pour les scénarios 2a et 2b). Seul le scénario 5a augmente ces émissions de méthane dû à la plus grande production des produits bois issus de bois industriel.

Les intervalles de confiance liés à l'incertitude des paramètres sont relativement élevés pour le scénario 1 ainsi que pour l'effet de substitution du scénario 4. Ils restent néanmoins acceptables pour une analyse incluant de nombreuses variables, et il est peu probable que les interprétations en soient changées.

Les graphes et valeurs ci-dessus permettent une analyse séparée des stocks et flux de carbone à cause des unités qui sont différentes. Les flux annuels des émissions fossiles par substitution et de méthane en décharge, s'ils sont cumulés sur une grande période de temps, peuvent appuyer ou contredire l'interprétation du stock de carbone dans les produits bois. De manière identique au calcul fait pour le scénario de référence au paragraphe 3.4.1., la variation dans le temps des scénarios alternatifs est analysée. Les flux des émissions fossiles (substitution) et de méthane annuels sont ajoutés aux stocks de carbone à l'équilibre dans les produits bois pour obtenir le stock cumulé total en fonction du temps, voir Tableau 8 et Figure 16.

Tableau 8: Flux des émissions fossiles (substitution) et de méthane annuels évitées (colonne a) et stock de carbone à l'équilibre dans les produits bois (colonne b) de chaque scénario, pour construire les droites $y = a.x + b$ de la Figure 16

	a (tCO ₂ eq/ha/an)	b (tCO ₂ eq/ha)
SA1	0,58	284,25
SA2a	0,48	243,38
SA2b	0,33	231,59
SA3a	0,07	242,72
SA3b	0,14	250,95
SA3c	0,21	259,05
SA4	0,57	268,55
SA5a	0,29	256,65
SA5b	-0,16	221,75
SR	0,00*	234,25

* Le flux du scénario de référence est mis à 0 car les valeurs des scénarios alternatifs sont la différence des flux par rapport au scénario de référence

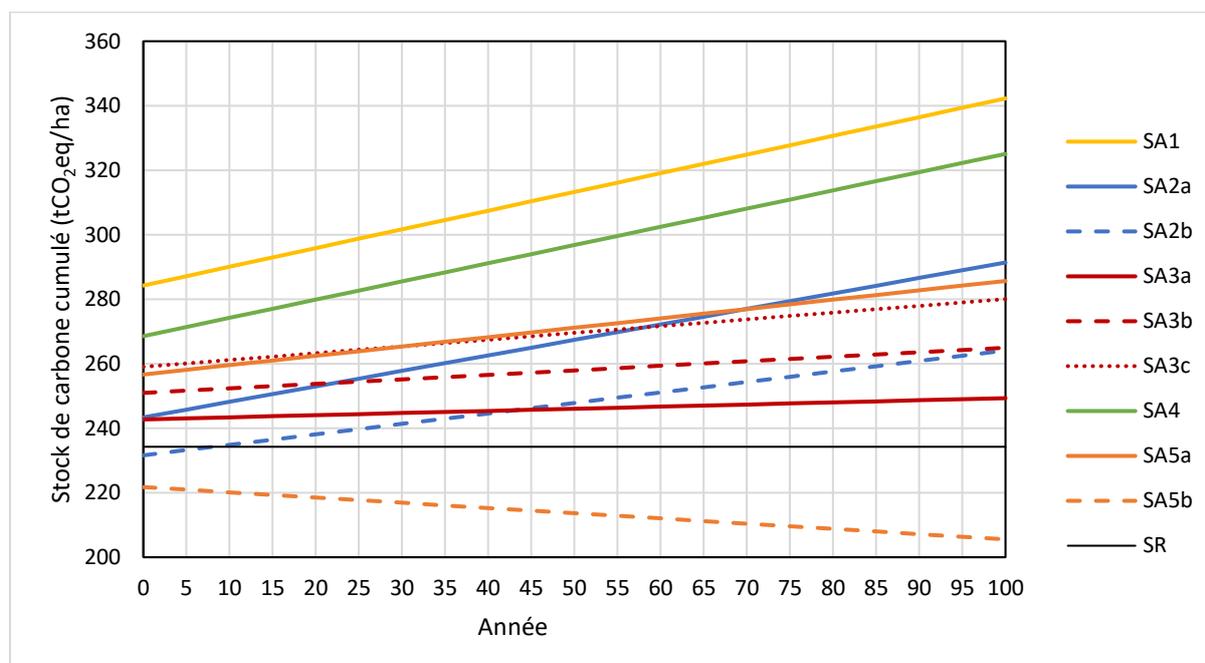


Figure 16: Stock de carbone cumulé en fonction du temps. L'ordonnée à l'origine est le stock de carbone total à l'équilibre et la pente est l'addition des flux des émissions fossiles (substitution) et de méthane annuels.

L'allongement de la durée de vie des produits (scénario 1), suivi de l'augmentation du recyclage (scénario 4) se détachent comme étant les scénarios permettant le plus de stockage possible dans les produits bois, initialement et dans le temps. Ils ont effectivement le stock de carbone à l'équilibre le plus élevé, ainsi que les flux de carbone annuels positifs les plus élevés. Mais les intervalles de confiance élevés du scénario 1 et de la substitution du scénario 4 peuvent aussi bien augmenter ou diminuer l'ordonnée à l'origine et la pente de ces courbes, et donc mitiger la robustesse des résultats. Les autres scénarios ont des trajectoires proches les unes des autres, à l'exception de l'augmentation du bois énergie (scénario 5b). Il est intéressant de constater que certaines trajectoires se croisent : en effet, le

scénario 2a, qui redirige la mise en décharge vers le recyclage, a un stock de carbone initial moins élevé que d'autres scénarios, mais son effet de substitution significatif et les émissions de méthane évitées permettent de cumuler davantage de carbone dans le temps que d'autres scénarios. Ce scénario aura un stock cumulé de carbone supérieur à celui du scénario 3b après 22 ans, du scénario 3c après 58 ans, et du scénario 5a après 70 ans¹⁰.

Tous les scénarios, à l'exception de l'augmentation du bois énergie (scénario 5b), permettent un stock de carbone cumulé dans le temps supérieur au stock à l'équilibre du scénario de référence dès la première année, et au bout de 8 ans pour la redirection de la mise en décharge vers l'incinération (scénario 2b). Cette supériorité s'accroît avec les années. A l'inverse, le scénario 5b, qui augmente la part de bois énergie et diminue celle de bois industriel, présente un stock de carbone initial inférieur à celui de la référence, et son stock cumulé diminue d'années en années car l'effet de substitution du bois énergie est moins important que celui des panneaux.

Les intervalles de confiance de la Figure 15, hormis pour les scénarios 1 et 4, étant acceptables, l'ordonnée à l'origine et la pente des courbes en seraient légèrement modifiées, mais sans que la pente ne s'inverse. Il est peu probable que la tendance générale de la Figure 16 soit profondément modifiée.

3.4.3. Impact des scénarios alternatifs sur les produits bois

En plus des stocks et émissions de carbone, le logiciel CAT permet d'obtenir le volume des produits bois dans chaque classe de produits, ainsi que le volume des catégories de grumes. La Figure 17 présente la distribution de la biomasse récoltée dans les catégories de grumes. Cette distribution est celle au moment de la récolte du bois en fonction de leur taille et diamètre, et provient des données de croissance forestière de la plateforme CAPSIS ainsi que de leur répartition dans les catégories de bois (paragraphe 3.3.3.), elle ne dépend donc pas de la transformation du bois en Wallonie et ces résultats sont donc identiques pour tous les scénarios. La Figure 18 présente la distribution des volumes de bois dans les classes de produits bois respectivement sans tenir compte et en tenant compte du recyclage en fin de vie. La classe de produit « Meuble » comprend les panneaux MDF et de particules, ainsi que les produits Autres du bois d'œuvre, la classe « Emballage » représente les palettes, bobines et caisses, la classe « Bois énergie » est les pellets, le bois énergie, les connexes, le bois de recyclage qui finissent en valorisation énergétique, la classe « Piquet » représente les piquets, poteaux et tuteurs, et la classe « Construction » représente tous les produits bois pour la construction issus du bois d'œuvre.

¹⁰ Ces durées ont été obtenues en faisant l'égalité des équations de deux droites :

$$\text{Année d'égalité de 2 scénarios} = \frac{\text{stock } B - \text{stock } A}{\text{flux } A - \text{flux } B}$$

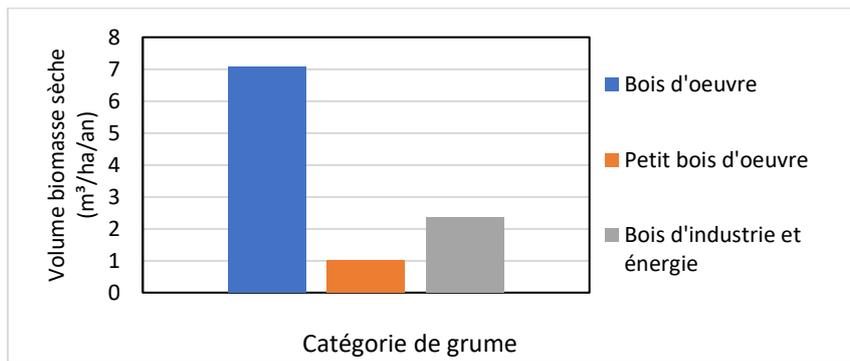


Figure 17: Distribution des volumes de biomasse dans les catégories de grumes

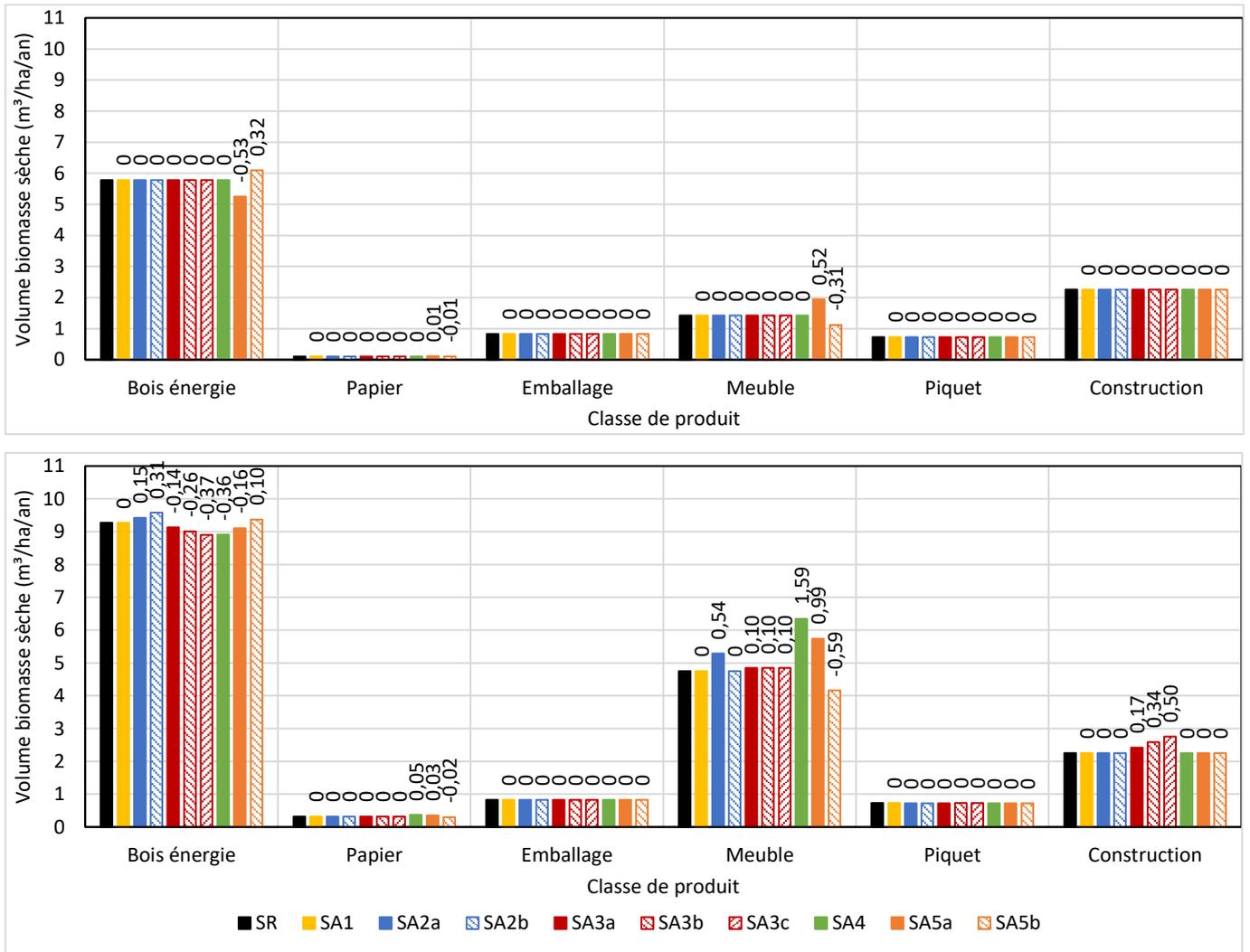


Figure 18: Distribution des volumes de biomasse dans les classes de produits bois, sans recyclage (en haut) et avec recyclage (en bas). Les valeurs correspondent à la différence avec le scénario de référence.

SR : Scénario de référence

SA1 : augmentation de la durée de vie des produits

SA2 : suppression de la mise en décharge, redirigée vers le recyclage (2a) et vers l'incinération (2b)

SA3 : augmentation du réemploi des produits de la construction et des panneaux de 10% (3a), 20% (3b), 30% (3c)

SA4 : augmentation du recyclage du bois d'œuvre et du MDF de 20%, des panneaux de particules et du papier de 5%

SA5 : moins de bois énergie et plus de bois industriel (5a), plus de bois énergie et moins de bois industriel (5b)

Les catégories de grumes « bois d'œuvre » et « petit bois d'œuvre », qui représentent la grande majorité du bois récolté, sont dirigées vers les scieries et les chantiers de découpe. Pourtant, les volumes des produits de la construction et de l'emballage et les piquets, poteaux, tuteurs sont très inférieurs aux volumes du bois énergie et des meubles (panneaux) avant recyclage. Cela montre que le bois énergie provient surtout des connexes (rappelons que les scieries produisent près de 50% de connexes, dont près de 90% terminent dans les chaudières ou centrales thermiques) et du bois industriel. C'est pour cela que la distribution du volume de la biomasse avant recyclage ne varie que dans le scénario 5, qui est le seul à rediriger certains flux de bois (bois énergie et bois industriel de la récolte et vers la granulation).

En considérant le recyclage, il était attendu de voir une augmentation générale du volumes des produits bois pour lesquels le recyclage ou le bois recyclé sont importants (papier, meubles et bois énergie). Cette augmentation est accentuée pour les scénarios favorisant le recyclage ou le réemploi : scénario 2a pour les panneaux de particules (meubles) ; scénario 3 pour le réemploi des produits de la construction (avec une augmentation proportionnelle au pourcentage de réemploi), et dans une moindre mesure les panneaux pour les meubles ; la plus grande augmentation de volume étant pour les meubles du scénario 4 grâce au recyclage du bois d'œuvre et des panneaux. Le recyclage et le réemploi se fait souvent au détriment du bois énergie, puisque moins de quantité de bois est disponible pour la valorisation thermique. A noter que les volumes des piquets, poteaux, tuteurs et les emballages ne varient pas car ces produits n'interviennent dans aucun scénario.

3.5. Discussion

Dans le cadre de cette étude, une analyse du stock et des flux de carbone dans les produits bois provenant de résineux récoltés en Wallonie a été réalisée pour l'année 2014, ainsi que pour une série de scénarios alternatifs présentant des changements d'usage et de fin de vie, choisis pour leur potentiel à accroître le stock de carbone dans les produits bois, et pour refléter des décisions politiques passées ou futures. La comparaison des scénarios alternatifs avec la référence permet de faire ressortir les bénéfices environnementaux de chaque scénarios. La comptabilité carbone a pu être réalisée grâce au logiciel CAT, spécialement développé pour modéliser des cycles de vie complexes ayant des émissions de gaz à effet de serre intersectorielles. Ce logiciel applique l'approche production pour les frontières du système étudié et la méthodologie Tier 1 pour les calculs de stocks et flux de carbone dans les produits bois et la biomasse selon le GIEC. Le logiciel ajoute l'évaluation des émissions fossiles lors de la transformation du bois, et l'effet de substitution si deux scénarios sont comparés.

3.5.1. Analyse des résultats

3.5.1.1. Réponse à la première question de recherche

Les résultats des stocks et de flux de carbone du scénario de référence sont donnés par hectare et par hectare annuel respectivement. Pour répondre à la première question de recherche qui est « Dans quelles mesures les produits bois peuvent-ils être une solution pour stocker le CO₂ de l’atmosphère, et ainsi atténuer le changement climatique ? », il est donc pertinent de considérer l’ensemble de la surface de résineux récoltée en Wallonie, qui est de 208.600 ha (paragraphe 2.2.1.). Le stock de carbone à l’équilibre dans les produits bois est un bénéfice obtenu une fois, tandis que les flux annuels interviennent chaque année dans la comptabilité carbone du territoire. Une mise en perspective est à faire en comparaison aux émissions de gaz à effets de serre annuelles en Wallonie, qui sont de 36,86 MtCO₂eq en moyenne entre 2014 et 2019 sans compter le changement d’affectation des sols (Agence wallonne de l’air et du climat, 2022).

La quantité de carbone stocké dans les produits issus de bois résineux en utilisation et en décharge est de 234,25 tCO₂eq/ha, ce qui représente au total 48,86 MtCO₂eq, soit l’équivalent de 1,3 années d’émissions territoriales de la Wallonie. Les émissions fossiles de la transformation du bois et les émissions de méthane en décharge représentent 1,76 tCO₂eq/ha/an, soit 0,367 MtCO₂eq/an. Ces émissions sont incluses dans les émissions territoriales annuelles selon la méthodologie de l’inventaire des émissions de gaz à effet de serre de l’Agence wallonne de l’air et du climat, elles en représentent 1%. La filière du bois résineux en Wallonie représente donc 1% des émissions territoriales, et permet à travers les produits fabriqués de subvenir à de nombreux besoins de nos modes de vie tout en stockant l’équivalent des émissions de gaz à effet de serre de 1,3 années de la Wallonie. Il faudrait ajouter à ces chiffres les émissions fossiles de la transformation du bois de feuillus, ainsi que le stock de carbone des produits issus de bois de feuillus. Sachant que le prélèvement de feuillus est environ trois fois inférieur au prélèvement de résineux (951.550 m³/an contre 3.218.099 m³/an), l’ajout de la filière de bois de feuillus ne fera certainement pas doubler les résultats de la filière de bois résineux. En comparaison, la production de ciment en Wallonie¹¹ représente 3,98 MtCO₂eq en 2019, soit 10,8% des émissions totales en Wallonie, ou 3,4% des émissions totales de la Belgique (116,7 MtCO₂eq en 2019), et la production de fer et d’acier en Belgique représente 4,09 MtCO₂eq en 2019, soit près de 3,5% des émissions totales en Belgique (Belgian interregional Environment Agency, 2022).

La filière bois permet donc avec un impact faible sur le climat d’obtenir un bénéfice important, le levier de cette filière dans l’atténuation du changement climatique semble être particulièrement intéressant à exploiter. Les conditions préalables sont une bonne gestion forestière qui permet le maintien voire l’augmentation de la surface forestière pour préserver les forêts. Une utilisation parcimonieuse du bois,

¹¹ En Belgique, la production de ciment a lieu uniquement en Wallonie.

substituant progressivement l'acier et le béton dans la construction à mesure que la bonne gestion forestière permette la récolte de bois nécessaire, permettrait d'augmenter ce levier, en stockant d'avantage de carbone et en remplaçant une partie de la production d'acier et de béton, très énergivore et émettrice de gaz à effet de serre. La réponse à la deuxième question de recherche étudie la pertinence des différents scénarios étudiés comme levier dans l'atténuation du changement climatique.

3.5.1.2. Réponse à la deuxième question de recherche

Pour répondre à la deuxième question de recherche « Comment adapter l'économie circulaire des produits bois et le changement des usages pour améliorer de manière efficace et durable le stockage du carbone ? », différents scénarios alternatifs proposant des variations dans l'usage et la transformation du bois ont été étudiés et comparés au scénario de référence. Il n'est pas pertinent de réaliser une classification de ces scénarios alternatifs du plus performant au moins performant en termes de stock de carbone et d'émissions évitées. En effet, les systèmes étudiés sont complexes et contiennent des hypothèses et incertitudes qu'une hiérarchie stricte n'est pas pertinent. De plus, selon la Figure 16, une telle classification dépend du temps. Il est cependant utile de relever et de discuter des tendances générales qui permettent ou non une amélioration du potentiel de stockage carbone des produits bois.

L'allongement de la durée de vie, le réemploi et le recyclage supplémentaire des produits bois (scénarios 1, 3 et 4 respectivement) font partis des principes de l'économie circulaire. Ces changements d'usage permettent, de façons différentes, de maintenir la matière en usage pendant plus longtemps que le scénario de référence, et décalent la fin de vie ultime du bois en incinération ou décharge. Cela augmente le stock de carbone dans les produits, ainsi que le volume des produits concernés, et diminue légèrement le stock de carbone en décharge car la matière arrive en centre d'enfouissement plus tardivement. Les produits bois substituent donc davantage d'autres produits, résultant en un effet de substitution important. D'après les Figures 15 et 16, l'allongement de la durée de vie est plus efficace que le recyclage, lui-même plus efficace que le réemploi pour le stockage du carbone dans les produits et les émissions évitées. Cette hiérarchie dépend fortement des conditions choisies dans les scénarios, et pourrait être différente si les durées d'allongement de la durée de vie des produits, les augmentations du taux de recyclage ou les taux de réemploi auraient été différentes. La stratégie de l'économie circulaire et de la construction circulaire consiste à d'abord utiliser les produits le plus longtemps possible, puis de réemployer et réutiliser les produits, et en dernier lieu de recycler les produits (Charlier M., 2019) (Ellen MacArthur Foundation, 2019). Cette logique se base sur les émissions fossiles engendrées : en effet, augmenter la durée de vie d'un produit ne requiert pas d'émissions, recycler un produit consiste à transformer la matière, et demande donc des processus industriels, tandis que le réemploi garde la forme du produit et ne demande que peu d'énergie pour le nettoyage ou la découpe à la bonne dimension. Les résultats obtenus dans cette étude, qui mettent le recyclage devant le réemploi, alors même que les émissions fossiles ont été prises en compte pour le recyclage et non pour le réemploi,

sont la conséquence de la plus grande quantité de bois recyclé supplémentaire dans le scénario 4 (notamment pour faire des panneaux) comparée à la quantité de bois réemployé dans les scénarios 3, comme le montre la forte augmentation du volume des produits du scénario 4 (Figure 18).

Les résultats des scénarios 2 et 5 donnent des informations sur la pertinence d'utiliser du bois énergie en substitution à d'autres sources d'énergie, le plus souvent fossiles. Les scénarios 2 redirigent le flux de bois de la mise en décharge (scénario de référence) vers le recyclage (scénario 2a) ou le bois énergie (scénario 2b). L'effet de substitution gagné est plus important dans le cas du recyclage que de l'incinération, et le stock de carbone à l'équilibre dans les produits bois augmente par rapport à la référence dans le cas du recyclage, alors qu'il diminue légèrement avec l'incinération. Malgré cette diminution, le stock de carbone cumulé augmente dans le temps pour les deux scénarios grâce aux émissions de méthane évitées. Il est important de noter que les scénarios 2 ne changent pas les flux de bois au moment de la récolte et durant la chaîne de transformation, ce que font les scénarios 5 : dans le scénario 5a, le bois récolté classifié comme bois d'énergie dans la référence est redirigé vers la filière de bois industriel, tout comme le bois industriel et les connexes initialement prévu pour la granulation sont redirigés vers les panneauitiers. Autrement dit, seuls les connexes industriels et le bois en fin de vie servent comme bois énergie dans les centrales, pour valoriser le bois récolté vers la fabrication de produits. A l'inverse, le scénario 5b redirige une partie du bois industriel récolté vers le bois énergie et la granulation. C'est bien la redirection des flux de bois le long de la chaîne de transformation qui engendre une différence significative entre les résultats des deux scénarios : la diminution du bois énergie (scénario 5a) permet une forte augmentation du stock de carbone à l'équilibre et dans le temps grâce à un effet de substitution élevé, tandis que l'augmentation du bois énergie (scénario 5b) est le seul qui présente un effet de substitution négatif et par conséquent un stock cumulé qui décroît avec le temps. Cela se comprend également grâce aux gains de volume des meubles du scénario 5a qui sont supérieurs aux gains de volume de bois énergie du scénario 5b (Figure 18), alors même que la diminution et l'augmentation de la proportion de bois énergie sont quasiment symétriques par rapport au scénario de référence (voir Tableau 6). Ces résultats montrent qu'utiliser du bois énergie pour son effet de substitution aux combustibles fossiles est pertinent lorsqu'il s'agit de connexes industriels ou de bois en fin de vie, mais pas de bois fraîchement récolté. En effet, il est plus efficace pour le stockage de carbone et l'effet de substitution de transformer le bois récolté en produit à moyenne ou longue durée de vie plutôt qu'en pellets. La comparaison des scénarios 2a et 2b montre également que l'effet de substitution est beaucoup plus important dans le cas de produits bois que de bois énergie. L'étude de Pichancourt et al. sur les stocks et émissions de carbone en Lorraine avec le logiciel CAT conclue aussi que rediriger une partie de la récolte de bois d'œuvre ou industriel vers le bois énergie provoque un effet de substitution négatif et une diminution du stock de carbone dans les produits, et donc un bilan global inférieur au scénario de référence (Pichancourt J.-B., 2018).

3.5.2. Analyse de sensibilité

Malgré l'utilisation de certains paramètres par défaut de la méthodologie Tier 1, l'utilisateur de CAT doit fournir une grande quantité de données pour modéliser au mieux la chaîne de valeur et de transformation du bois sur un territoire. Une grande attention a été apportée à collecter des données spécifiques au cas de cette étude, c'est-à-dire le territoire wallon en 2014. Cela a notamment été le cas pour les flux de la transformation du bois (voir diagramme de flux Figure 12) dont les données proviennent de rapports sectoriels et d'estimation d'experts, et la majorité des émissions fossiles. Cependant, les données des émissions fossiles ont été indiquées pour chaque produit final, et non pour les processus intermédiaires, et comprend la fabrication complète du produit (faire un diagramme détaillant les processus intermédiaires aurait été complexe et très long). Or, certains produits bois, comme les panneaux et les pellets, sont fabriqués en grande partie avec des connexes. De ce fait, il est possible qu'il y ait eu un double-comptage des émissions fossiles des processus de transformation communs pour le bois d'œuvre et les connexes. De plus, les données des facteurs de substitution ont été collectées dans la littérature générale, faute d'avoir des données territoriales, et il est communément admis que ces facteurs présentent des incertitudes élevées. Ces facteurs proviennent d'une étude suédoise et norvégienne et sont parmi les plus petits de la littérature, puisque ces pays ont un mix électrique relativement décarboné (14 gCO₂eq/kWh pour la Norvège, 21 gCO₂eq/kWh pour la Suède, contre 211 gCO₂eq/kWh pour la Belgique en moyenne entre 2009 et 2011 (International Energy Agency, 2013)). Bien que les facteurs de substitution prennent davantage de paramètres en compte que le mix électrique du pays, le choix de facteurs de substitution suédois et norvégiens peuvent avoir une influence sur les résultats de cette étude. C'est pourquoi l'analyse de sensibilité portera sur les données des émissions fossiles et des facteurs de substitution.

L'analyse de sensibilité a pour but de déterminer comment les hypothèses utilisées dans l'étude peuvent affecter la pertinence et robustesse des résultats. Les données fondées sur des hypothèses ou des estimations peu robustes vont être modulées pour observer leur influence sur les résultats. Il a été choisi ici de faire varier les émissions fossiles et les facteurs de substitution de -20% et +20% par rapport aux données utilisées, et de refaire le calcul des stocks et des flux de carbone de chaque scénario. Pour rappel, dans les résultats obtenus par le logiciel CAT, les émissions fossiles sont données lors de l'analyse d'un scénario individuel, alors que dans le cas d'une comparaison de deux scénarios, c'est l'effet de substitution d'un scénario sur l'autre qui est donné (voir paragraphe 3.2.1.). Les résultats de l'analyse de sensibilité sont présentés dans la Figure 19.

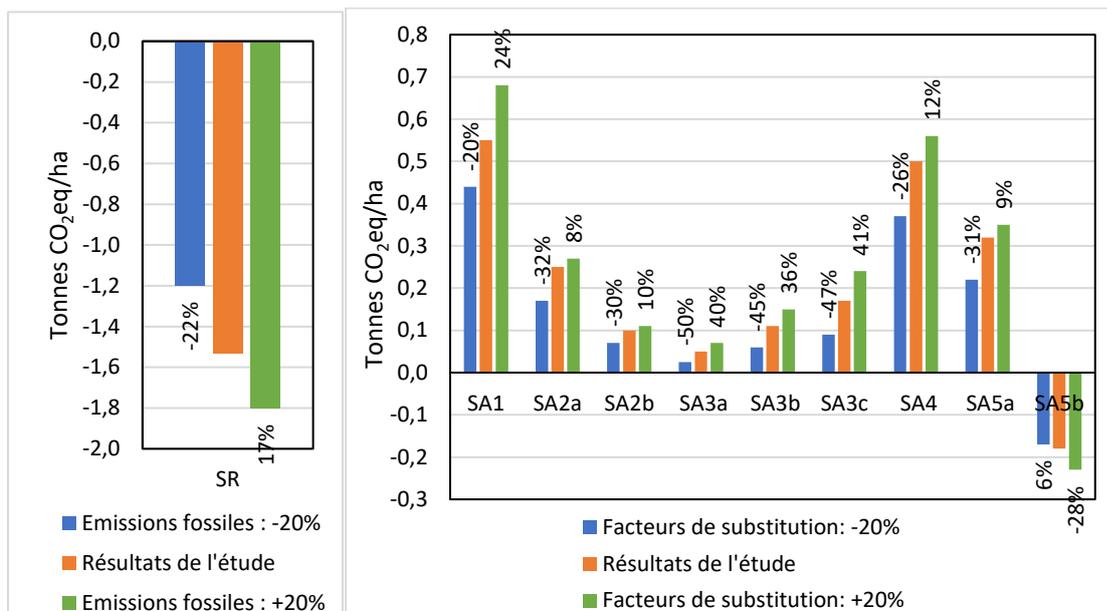


Figure 19: Analyse de sensibilité des émissions fossiles pour le scénario de référence (à gauche) et des facteurs de substitution pour les scénarios alternatifs (résultats de la différence avec le scénario de référence, à droite). Les valeurs en pourcentages sont la différence avec les résultats de l'étude.

SA1 : augmentation de la durée de vie des produits

SA2 : suppression de la mise en décharge, redirigée vers le recyclage (2a) et vers l'incinération (2b)

SA3 : augmentation du réemploi des produits de la construction et des panneaux de 10% (3a), 20% (3b), 30% (3c)

SA4 : augmentation du recyclage du bois d'œuvre et du MDF de 20%, des panneaux de particules et du papier de 5%

SA5 : moins de bois énergie et plus de bois industriel (5a), plus de bois énergie et moins de bois industriel (5b)

Il apparaît clairement que la variation des émissions fossiles du scénario de référence provoque une modification des résultats environ proportionnelle à cette variation. Cette logique n'est cependant plus respectée pour les facteurs de substitution car c'est la différence des résultats des scénarios alternatifs avec le scénario de référence qui est considérée. Dans le cas du scénario de référence, l'augmentation et la diminution des émissions fossiles doit s'analyser au regard du stock de carbone total dans la biomasse et les produits bois (825 tCO₂eq/ha), pour obtenir la durée au bout de laquelle les émissions fossiles, ainsi que les émissions de méthane à hauteur de 0,23 tCO₂eq/ha/an, auront dépassé les stocks de carbone à l'équilibre (analyse similaire à celle réalisée au paragraphe 3.4.1.). Cette durée est de 578 ans et 407 ans pour une variation des émissions fossiles respectivement de -20% et +20%, et de 468 ans dans le cas de cette étude. Les variations ne sont pas négligeables. Il faut cependant souligner que les données des émissions fossiles telles qu'utilisées dans cette étude contiennent potentiellement un double comptage (voir plus haut), ce qui signifie que les valeurs réelles se trouvent probablement plutôt dans un intervalle de variation des émissions fossiles de 0 à -20% que de 0 à +20%.

La variation de l'effet de substitution pour les scénarios alternatifs dépassent souvent -20% ou +20% par rapport à la référence, allant jusqu'à 50%. Il est visuellement plus aisé de se rendre compte de l'ampleur de ces variations sur le stock de carbone cumulé grâce à la Figure 20, construire de manière similaire à la Figure 16. La pente des courbes représente la somme des émissions de méthane (selon

les résultats de l'étude) et de l'effet de substitution, avec pour chaque scénario les facteurs de substitution de -20% et +20% par rapport aux données de l'étude. L'aire entre les deux courbes de chaque scénario représente donc les valeurs possibles pour le stock de carbone cumulé dans le temps. Au bout de 100 ans, la variation du stock de carbone cumulé est relativement importante pour les scénarios 1 et 4 (ceux présentant les effets de substitution les plus élevés), et beaucoup moins pour les autres scénarios. Néanmoins, il n'y a pas de changement dans les tendances générales discutées au paragraphe 3.5.1.2.. De plus, compte-tenu de la grande différence de l'intensité carbone du mix énergétique entre les pays fournissant les facteurs de substitution (Norvège et Suède) et la Belgique, des facteurs de substitution belges seraient probablement plus élevés que ceux choisis, ce qui réduit davantage la plage de variation des résultats de stock de carbone cumulé. L'analyse de sensibilité révèle que la qualité des données choisies pour les facteurs de substitution est acceptable, et que les résultats qui en découlent sont robustes.

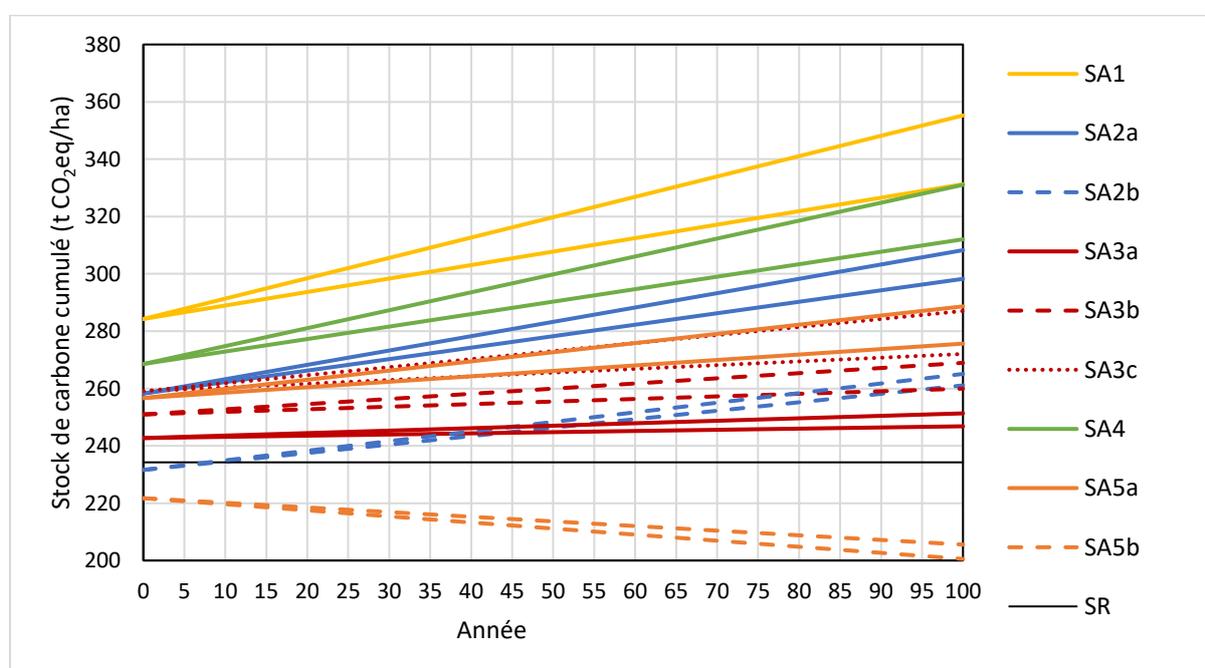


Figure 20: Stock de carbone cumulé en fonction du temps des scénarios selon l'analyse de sensibilité (les deux droites de chaque scénario considèrent les facteurs de substitution à -20% et +20% par rapport aux données de l'étude).

SR : scénario de référence

SA1 : augmentation de la durée de vie des produits

SA2 : suppression de la mise en décharge, redirigée vers le recyclage (2a) et vers l'incinération (2b)

SA3 : augmentation du réemploi des produits de la construction et des panneaux de 10% (3a), 20% (3b), 30% (3c)

SA4 : augmentation du recyclage du bois d'œuvre et du MDF de 20%, des panneaux de particules et du papier de 5%

SA5 : moins de bois énergie et plus de bois industriel (5a), plus de bois énergie et moins de bois industriel (5b)

Partie 4 : Conclusion

4.1. Récapitulatif et réponse à la problématique

L'analyse du potentiel des produits bois dans l'atténuation du changement climatique a guidé la réalisation de cette étude. Les produits bois permettent de répondre à de nombreux besoins matériels et énergétiques et ont la capacité de stocker pendant toute leur durée de vie sous forme de carbone le CO₂ de l'atmosphère absorbé par l'arbre. De plus, les produits bois se substituent à des énergies fossiles ou d'autres matériaux plus énergivores, apportant un autre bénéfice en terme d'émissions de CO₂ évitées. Ces avantages ont été de plus en plus pris en compte ces dernières années dans l'établissement de politiques et d'actions pour le secteur du bois, mais l'efficacité de ces décisions politiques n'est pas mesurée. C'est pourquoi cette étude vise à mesurer ce potentiel de stockage carbone dans les produits bois à travers l'exemple du territoire wallon, ainsi que l'efficacité de différents scénarios alternatifs qui renforcent l'économie circulaire et les changements d'usage des produits : allongement de la durée de vie, augmentation du recyclage, réemploi, augmentation et diminution du bois énergie, fin de la mise en décharge. La méthode de calcul du carbone stocké dans les produits bois se base sur la méthodologie Tier 1 des *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories* qui est utilisée dans le logiciel de comptabilité carbone utilisé. D'autres paramètres sont également pris en compte, qui sont des flux essentiels pour analyser la filière bois dans son ensemble : la substitution aux énergies fossiles, les émissions fossiles de la transformation du bois, l'accumulation de carbone non-dégradable en décharge et les émissions de méthane de la décomposition du bois en décharge. L'application de cette méthodologie a été réalisée pour le bois issus de résineux récoltés en Wallonie et transformés en Wallonie ou ailleurs, comme décrite par l'approche production des *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*.

L'analyse du scénario de référence montre que la production de bois issus des forêts de résineux wallonnes permet de stocker à l'équilibre 48,86 MtCO₂eq, soit l'équivalent de 1,3 années d'émissions territoriales de la Wallonie. Durant une année, les émissions fossiles de la transformation du bois résineux et les émissions de méthane en décharge sont de 0,367 MtCO₂eq/an, ce qui représente 1% des émissions territoriales annuelles de la Wallonie. En comparaison avec la production de ciment et d'acier, qui représentent respectivement 10,8% des émissions wallonnes et 3,5% des émissions totales de la Belgique, la filière bois a un impact sur l'environnement très limité et a en plus l'avantage de stocker du carbone, ce que ne font pas les autres matériaux. La condition sine qua non pour ne pas avoir d'effet rebond est une gestion durable des forêts. Les produits bois présentent donc un levier très intéressant et non négligeable dans l'atténuation du changement climatique. La prise en compte de l'exploitation et la transformation des feuillus, dont la récolte annuelle est plus de trois fois inférieure à celle des résineux, ne change pas cette conclusion.

Pour augmenter l'efficacité de ce levier, différents scénarios décrivant des changements d'usage et de l'économie circulaire ont été analysés et comparés au scénario de référence. Les scénarios les plus bénéfiques pour le stockage du carbone dans les produits et les émissions de gaz à effet de serre évitées par la substitution et le méthane en décharge sont ceux augmentant la durée de vie des produits et le recyclage en fin de vie pour produire des panneaux. L'effet de substitution à d'autres produits y était particulièrement élevé. Alors même que selon l'économie circulaire le réemploi est à privilégier avant le recyclage, le réemploi d'une partie des produits en fin de vie est moins bénéfique car les volumes de produits bois concernés sont inférieurs à ceux du recyclage. Les conditions initiales des scénarios ont donc une influence majeure dans les résultats. L'analyse de scénarios portant sur le bois énergie et la mise en décharge montre que l'effet de substitution est plus important lorsque le bois récolté ou allant en décharge est utilisé pour fabriquer des produits à moyenne ou longue durée de vie plutôt que pour remplacer des combustibles fossiles. La stratégie qui en ressort serait d'utiliser tout le bois récolté pour la fabrication de produits, et de n'utiliser que les connexes industriels et les produits en fin de vie pour la production d'énergie en centrale thermique. Les facteurs de substitution faisant communément l'objet d'une incertitude élevée et ayant une grande importance dans les résultats, une analyse de sensibilité a été réalisée sur les facteurs de substitution, ainsi que sur les émissions fossiles de la transformation. L'analyse de sensibilité n'a pas montré de changements dans l'interprétation des résultats et la conclusion de l'étude.

4.2. Limites de l'étude

L'utilisation du logiciel CAT pour analyser des scénarios de cycle de vie des produits bois est intéressante pour la prise de décision concernant l'implémentation de nouvelles mesures dans la filière bois. Il faut cependant garder en tête certaines limites dans la méthodologie choisie dans cette étude.

Un aspect important est que les impacts environnementaux sont analysés via un seul indicateur d'impact qui est le potentiel de réchauffement climatique à travers les émissions de gaz à effet de serre. Une analyse environnementale complète devrait comporter d'avantages d'impacts environnementaux comme les émissions de particules fines dans l'air provenant de la combustion du bois, l'acidification et l'eutrophication de l'eau et des sols, la surface terrestre ou la quantité d'eau utilisées.

Les scénarios ont été définis en modifiant certains paramètres du scénario de référence, sans étudier dans quelle mesure la modification de ces paramètres aurait eu une influence sur la filière bois et les autres secteurs de l'économie. En effet, selon les sciences économiques, il faut analyser de manière conséquente l'augmentation de la production d'un produit sur le marché et les changements globaux et dynamiques sur le système analysé. Par exemple, l'augmentation de la durée de vie, du taux de recyclage ou du taux de réemploi des produits permettent d'utiliser la matière bois plus longtemps, très souvent pour un second usage chez un utilisateur différent, qui n'aurait alors pas besoin d'acheter un produit bois neuf. Il est donc fort possible que dans de tels cas, la demande de bois neuf diminue. Cela

pourrait résulter en la redirection du bois récolté non utilisé vers le bois énergie, améliorant ainsi l'effet de substitution, ou bien à récolter moins de grumes, augmentant le stock de carbone dans la biomasse. De la même manière, ne plus utiliser du bois récolté pour l'énergie doit être analysé au regard du besoin en énergie d'un territoire, qui dépend fortement des conditions météorologiques annuelles et du contexte géopolitique de l'approvisionnement en énergie. Selon ces conditions, il n'est peut-être pas possible de se séparer entièrement du bois énergie issus de la récolte. Faute de données et de temps, une analyse conséquente n'a pas été réalisée dans cette étude.

De même, définir une prise de décision n'implique pas que les effets de cette décision apparaissent immédiatement, ils sont au contraire implémentés graduellement. Or, le logiciel CAT considère que le diagramme de flux est constant dans le temps, ce qui n'est pas réaliste. Les développeurs du logiciel ont prévu de corriger ce biais en ajoutant une fonction où la configuration de référence change graduellement vers la configuration alternative durant une certaine période (Pichancourt J.-B., 2018).

Enfin, la sylviculture et la récolte du modèle de croissance GYMNOS suivent la trajectoire idéale qui est celle des tables de production sylvicoles pour les forêts publiques. Dans la réalité, rien n'oblige les propriétaires forestiers privés de suivre ces tables de production sylvicole pour la récolte. De même, la récolte de bois s'adapte dans la pratique en fonction de différentes conditions (météorologiques, sanitaires, économiques) pour répondre à l'offre et à la demande en bois du moment. Les récoltes peuvent donc être supérieures ou inférieures à celles proposées par les tables de production.

4.3. Perspectives

Ce cas d'étude en Wallonie de l'utilisation du logiciel CAT montre son potentiel dans l'aide à la prise de décision concernant des politiques et actions pour le secteur du bois. A l'instar des limites présentées dans le paragraphe précédent, l'utilisation de ce logiciel pour l'aide à la prise de décision devrait s'accompagner des analyses suivantes pour refléter au mieux la situation réelle d'un territoire :

- Les récoltes sylvicoles doivent être estimées pour les prochaines années en prenant en compte les conditions météorologiques (chaleur, sécheresse etc.), sanitaires (attaques d'insectes) mais aussi le marché économique (analyse input-output) pour prévoir la juste récolte de bois permettant de répondre à la demande. Ces conditions de récolte doivent être appliquées chaque année pour les forêts publiques, et être recommandées pour les forêts privées.
- Les décisions envisagées pour le secteur de la transformation et fin de vie du bois (comme le recyclage, le réemploi, la mise en décharge, etc.) doivent être analysées de manière conséquente sur le marché (également grâce à une analyse input-output) pour prévoir les changements intersectorielles dans l'économie. Également l'effet de la prise d'une décision dans le temps doit être considérée, sachant que les changements de tout un secteur prennent plusieurs années, voire dizaines d'années, à se mettre complètement en place.

Annexe 2 : Données des flux de la transformation du bois en Wallonie

Récolte et débris forestiers	Flux sortant	Quantité (Mm ³)	%	Source
Récolte résineux	Bois d'oeuvre scierie	2,06	65	(Thyssen N., 2014)
	Bois d'oeuvre chantier de découpe	0,95	30	
	Bois industriel	0,13	4	
	Bois énergie	0,03	1	
Débris fins (branches)	Litière (forêt)	0,56	95	(Pichancourt J.-B., 2018) ; (Thyssen N., 2014)
	Chauffage résidentiel		5	
Débris grossiers (souches et racines)	Bois mort (forêt)		100	(Pichancourt J.-B., 2018)
Débris d'arbres morts et tombés	Bois mort (forêt)		95	(Pichancourt J.-B., 2018)
	Chauffage résidentiel		5	

Catégorie de bois et connexes	Flux sortant	Quantité (Mm ³)	Quantité (kt)	%	Source
Bois d'oeuvre	Scierie	2,46		100	(Thyssen N., 2014)
Bois industriel	Panneautier	0,203		81	(Bays, 2021)
	Industrie de la pâte à papier et du papier	0,005		2	
	Granulation	0,043		17	
Bois énergie	Cogénération		156	32	(Bays, 2021)
	Chauffage industriel		28,9	6	
	Chauffage collectivité		6,1	1	
	Chauffage résidentiel		294,5	61	
Connexes	Panneautier	0,185		8,4	(Bays, 2021)
	Industrie de la pâte à papier et du papier	0,049		2,2	
	Granulation	0,66		30	
	Cogénération	1,17	507	53	
	Chauffage industriel	0,11	49,1	5,0	
	Chauffage collectivité	0,014	6,1	0,6	
	Chauffage résidentiel	0,007	3,1	0,3	

Conversion: 1 tonne sèche = 2,3 m³

Transformation du bois	Flux sortant	Quantité (Mm³)	%	Source
Chantier de découpe	Bois d'oeuvre	0,4	42	(Thyssen N., 2014)
	Entreprise de travail du bois rond	0,33	35	
	Bois industriel	0,124	13	
	Connexe	0,095	10	
Travail du bois rond	Produit: Piquets, poteaux, tuteurs		80	Peter Müller GmbH (appel téléphonique 14/01/22)
	Connexes		20	
Scierie	Entreprise de construction	0,94	38	(Thyssen N., 2014) ; (Bays, 2021)
	Fabrication d'emballages	0,36	14	
	Autres	0,06	2	
	Connexes	1,14	46	
Entreprise de construction	Produit: Charpente, lamellé-collé, CLT, ossature, ...		90	Eugène Bays (mail 10/01/22) ; Peter Müller (appel téléphonique 14/01/22)
	Connexes		10	
Fabrication d'emballages	Produit: Palettes, caisses, bobines,		90	Groupe François (appel téléphonique 17/01/22)
	Connexes		10	
Autres	Produit: meubles, ...		90	Hypothèse
	Connexes		10	
Panneautier	Produit: MDF	0,3	62	Eugène Bays (mail 10/01/22)
	Connexes pour chauffage industriel	0,185	38	
Industrie de la pâte à papier et du papier	Produit: papier (papier couché, papier hygiène, carton)		88	Burgo Ardennes (appel téléphonique 19/01/22)
	Connexes pour chauffage industriel		1	
	Liqueur noire		11	
Granulation (pellets)	Produit: pellets		100	(Bays, 2021)
Panneautier Flandres	Produit: panneaux de particule		83	Unilin (mail 12/01/22)
	Connexes pour chauffage industriel		17	

Produits: fin de vie	Flux sortant	Quantité (kt)	%	Source
Fin de vie bois d'oeuvre (construction, emballage, autres)	Panneautiers Flandres	165	50	(Bays, 2021)
	Cogénération	117	36	
	Chauffage industriel	11,3	3	
	Chauffage collectivité	6,1	2	
	Chauffage résidentiel	12,7	4	
	Décharge		5	WOOD.BE (discussion 08/02/22)
Piquets, poteaux, tuteurs	Cogénération		100	Peter Müller GmbH (appel téléphonique 14/01/22)
MDF	Panneautiers Flandres		50	WOOD.BE (discussion 08/02/22)
	Cogénération		45	
	Décharge		5	
Papier	Industrie de la pâte à papier et du papier (recyclage)		76	(inDUfed, 2022)
	Cogénération		24	
Granulation (pellets)	Génération	0	0	(Bays, 2021)
	Cogénération	8,3	15,3	
	Chauffage industriel	1,7	3,1	
	Chauffage collectivité	1,7	3,1	
	Chauffage résidentiel	42,5	78,4	
Panneaux de particules	Panneautiers Flandres		85	WOOD.BE (discussion 08/02/22)
	Cogénération		10	
	Décharge		5	

Annexe 3 : Catégories des grumes

Catégorie de grume (comme définit dans CAT)	Diamètre minimum à hauteur de poitrine (cm)	Volume commercial (%)	Source
Bois d'oeuvre	40	85	(Inventaire Forestier National, 2009) ; WOOD.BE (discussion 08/02/22); (Thyssen N., 2014)
Petit bois d'oeuvre	27,5	40	
Bois industrie et bois énergie	10	40	

Annexe 4 : Durée de vie moyenne des produits bois

Produit bois	Durée de vie estimée (<i>national estimated service life</i>) (années)	Obsolescence	Durée de vie ajustée (<i>adjusted estimated service life</i>) (années)	Source
Bois d'oeuvre construction	70	0,9	63	(IPCC, 2019a)
Bois d'oeuvre emballages	6	0,3	1,8	
Bois d'oeuvre meubles	45	0,6	27	
Panneaux	construction: 60	construction: 0,7	30,5*	
	Meubles: 35	Meubles: 0,6		
	Emballages: 6	Emballages: 0,3		
Papier	Papier: 10	Papier: 0,2	1,86**	
	Emballages: 3	Emballages: 0,3		
Piquets, poteaux, tuteurs			15	Peter Müller (appel téléphonique 14/01/22)
Bois énergie			1,7	(Pichancourt J.-B., 2018)

* Moyenne réalisée en fonction de la part de marché des usages (construction: 50%, meubles: 45%, emballages: 5%). Source: (IPCC, 2019a)

** Moyenne réalisée en fonction de la part de marché des usages en Wallonie (papier: 87,5%; Emballages: 12,5%). Source: Burgo Ardennes (appel téléphonique 19/01/22)

Annexe 5: Facteurs de substitution

Produit bois et usage	Unité fonctionnelle (tonne)	Facteur de substitution (tC / UF*)	Facteur de substitution (kg C/kg produit)	Source
Bois d'oeuvre construction	0,409	0,50**	1,22	(Pichancourt J.-B., 2018)
Bois d'oeuvre emballages	0,025	0,03	1,08	
Bois d'oeuvre meubles	1	0,96	0,96	
Panneaux MDF	0,566	0,54	0,96	
Panneaux particules	0,7	0,67	0,96	
Papier	1	n/a	n/a	
Piquets, poteaux, tuteurs	0,39	0,40	1,03	
Bois énergie: cogénération	0,51	0,40***	0,78	
Bois énergie: chauffage industriel	0,51	0,44***	0,86	
Bois énergie: chauffage collectivités	0,51	0,47***	0,92	
Bois énergie: chauffage résidentiel	0,51	0,44***	0,86	

* Unité fonctionnelle

** moyenne des différents usages

*** les facteurs de substitution pour le bois énergie ont été légèrement adaptés au contexte wallon

Annexe 6 : Emissions fossiles de la transformation des produits bois

Classe de produit	Unité fonctionnelle	Densité (t/m ³)	kg CO ₂ eq	Source
. Bois de sciage (avec traitement de préservation)	1 m ³	389,7	27,8	(Richard A., 2015a)
. Bois de sciage séché	1 m ³	389,7	32,6	(Richard A., 2015a)
. Glued laminated timber	1 m ³	446,8	119	ACV réalisée avec les données suivantes en adaptant le transport du bois : (Richard A., 2015b)
Construction: moyenne	1 m ³	408,7	59,8	
Emballage: palette	1 palette = 25 kg		7,47	(Richard A., 2015a) Hypothèse: fabrication très similaire au bois de sciage séché
Autres: meubles bois massif	1000 kg		298,8	(Richard A., 2015a) Hypothèse: fabrication très similaire au bois de sciage séché
Piquets, poteaux, tuteurs	1 m ³	389,7	27,8	(Richard A., 2015a) Hypothèse: produit très similaire au bois de sciage avec traitement de préservation
MDF	1 m ³	566,3	450	(Zeller V., 2015)
Papier	1000 kg = 600 kg de biomasse		1117	ACV réalisée avec les données suivantes, en adaptant leur quantité au contexte wallon: "Paper, woodcontaining, supercalendered {RER} paper production, woodcontaining, supercalendered" ; "Paper, newsprint {Europe without Switzerland} paper production, newsprint, recycled" ; "Sulfate pulp, unbleached {RER} sulfate pulp production, from softwood, unbleached", ecoinvent v3.8
Pellets	1000 kg		133	"Wood pellet, measured as dry mass {RER} wood pellet production", ecoinvent v3.8
Panneaux de particules	1 m ³	700 kg	279	"Particleboard, uncoated {RER} particleboard production, uncoated, average glue mix", ecoinvent v3.8

Annexe 7: Stocks et flux de carbone du scénario de référence

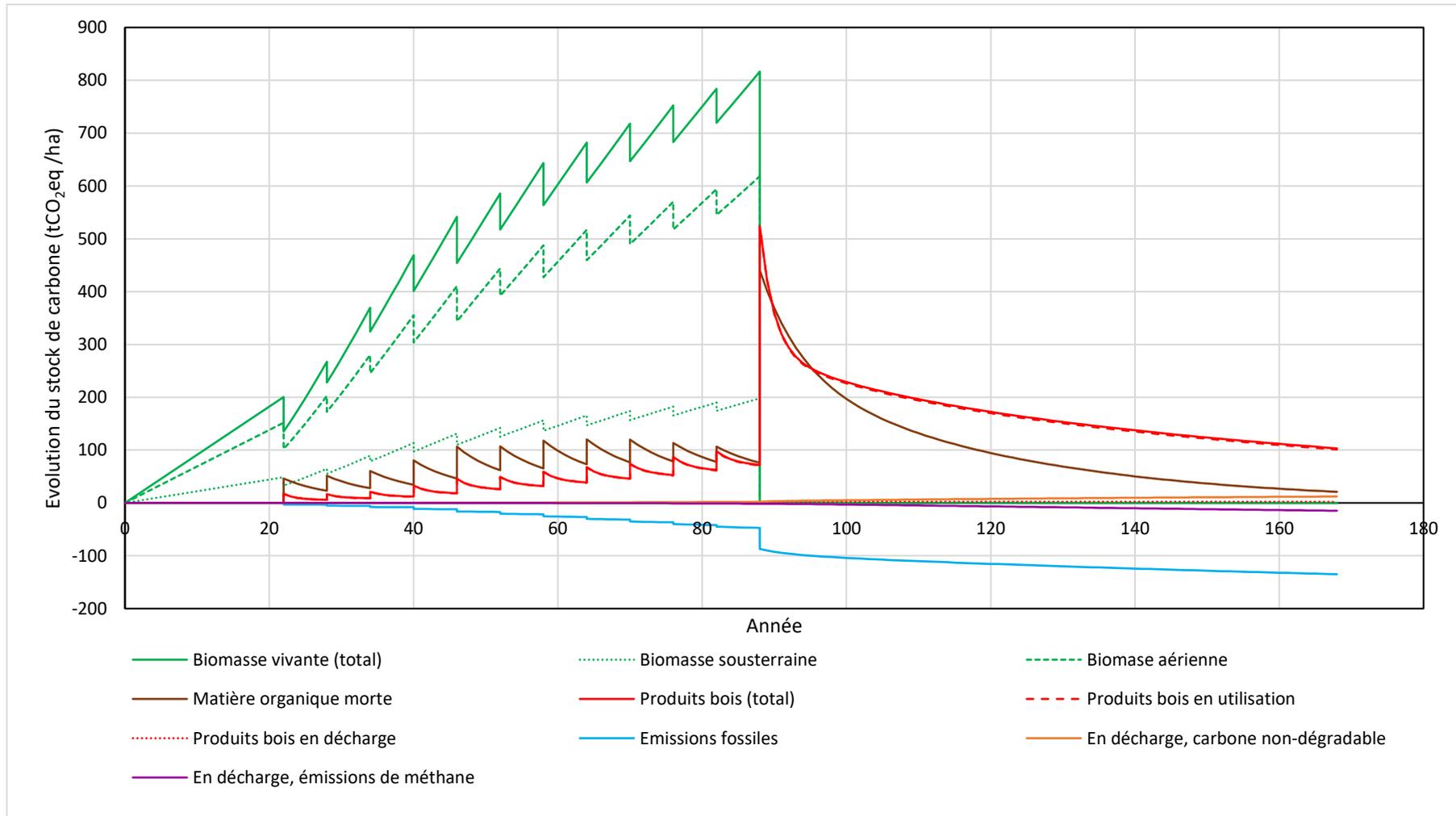


Figure 21: Evolution de stocks et des flux de carbone d'une parcelle d'un hectare, plantation à t=0. Les courbes « Produits bois (total) » et « Produits bois en utilisation » sont très proches l'une de l'autre.

Bibliographie

- Agence wallonne de l'air et du climat. 2022.** Inventaire d'émission de Gaz à effet de serre (GES) - 2021. [En ligne] 15 March 2022. [Citation : 13 May 2022.] <https://awac.be/inventaires-demission/emission-de-ges/>.
- Angerand, S. 2021.** 500 SCIENTIFIQUES ALERTENT SUR LE BOIS ÉNERGIE. *Canopée Forêts vivantes*. [En ligne] 16 March 2021. [Citation : 08 April 2022.] <https://www.canopee-asso.org/500-scientifiques-alertent-sur-le-bois-energie/>.
- Ashton M., Tyrrell M. 2012.** *Managing forest carbon in a changing climate*. s.l. : Springer, 2012.
- Bastin J.-F., Finegold Y., Garcia C. 2019.** The global tree restoration potential. 2019, Vol. 365, 6448.
- Bays, E. 2021.** *PanoraBois Wallonie, Edition 2021*. s.l. : Office Economique Wallon du Bois, 2021.
- Belgian interregional Environment Agency. 2022.** *Belgium's greenhouse gas inventory (1990 - 2020), National Inventory Report Submitted under the United Nations Framework Convention on Climate Change*. 2022.
- Boulton C., Lenton T., 2022.** Pronounced loss of Amazon rainforest resilience since the early 2000s. *Nature Climate Change*. 12, 2022.
- Brunet-Navarro P., Johheim H. 2016.** Modelling carbon stocks and fluxes in the wood product sector: a comparative review. *Global Change Biology*. 22, 2016.
- Bureau Fédéral du Plan. 2022.** Emissions de gaz à effets de serre. *Indicators.be*. [En ligne] 2022. [Citation : 12 April 2022.] https://indicators.be/fr/i/G13_GHG/%C3%89missions_de_gaz_%C3%A0_effet_de_serre.
- Cardellini, G. 2018.** *Forest products: contribution to carbone storage and climate change mitigation*. s.l. : KU Leuven, 2018.
- CCTB. 2022.** 24 Superstructures en bois. *Cahier des Charges Type-Bâtiments 2022*. [En ligne] 2022. [Citation : 9 April 2022.] https://batiments.wallonie.be/files/live/sites/SMD_CCT/files/unzip/html_CCTB_01.07/Content/24-Superstructures-en-bois.html.
- Charlier M. 2019.** La construction circulaire, bien loin du recyclage. *Architectura*. [En ligne] 18 March 2019. [Citation : 4 May 2022.] <https://architectura.be/fr/actualite/la-construction-circulaire-bien-loin-du-recyclage/>.
- Chiritescu, Bianca.** Géographie et environnement - le cycle du carbone. [En ligne] <https://biancachiritescu.blogspot.com/p/le-cycle-du-charbon.html>.
- Ellen MacArthur Foundation. 2019.** Circular economy systems diagram. [En ligne] February 2019. [Citation : 4 May 2022.] <https://ellenmacarthurfoundation.org/circular-economy-diagram>.
- EU. 2008.** DIRECTIVE 2008/98/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 19 November 2008 on waste and repealing certain Directives. *Official Journal of the European Union*. 2008.
- European Commission. 11.03.2020.** *A new Circular Economy Action Plan for a cleaner and more competitive Europe*. 11.03.2020.
- European Commission, Directorate-General for Research and Innovation. 2018.** *A sustainable bioeconomy for Europe : strengthening the connection between economy, society and the environment : updated bioeconomy strategy*. s.l. : Publications Office of the European Union, 2018.
- European Parliament. 2018.** The circular economy package: new EU targets for recycling. [En ligne] 16 April 2018. [Citation : 17 April 2022.] <https://www.europarl.europa.eu/news/en/headlines/society/20170120STO59356/the-circular-economy-package-new-eu-targets-for-recycling>.
- FAO. 2020.** Natural forest management. [En ligne] Food and Agricultural Organization, 2020. [Citation : 04 04 2022.] <https://www.fao.org/forestry/sfm/85084/en/>.
- Fédération Nationale du Bois.** Les étapes de la première transformation du bois. [En ligne] [Citation : 09 April 2022.]
- Fleischmann F., Basant S. 2020.** Pitfalls of Tree Planting Show Why We Need People-Centered Natural Climate Solutions. *BioScience*. 2020, Vol. 70, 11.

- Fortin M., Ningre 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*. 2012, Vol. 279.
- Frère H., Langendries D., Georges M. 2022.** La filière bois belge. *Hout Info Bois*. [En ligne] 2022. [Citation : 08 April 2022.] <https://www.houtinfobois.be/la-foret-et-le-bois/la-filiere-bois-belge/>.
- FSC. 2022.** FSC. [En ligne] 2022. [Citation : 08 April 2022.] [fsc.org](https://www.fsc.org).
- Gobbo E., Ghyoot M. 2021.** *Reuse in environmental impact assessment tools, a prospective report*. s.l. : Interreg NWE 739 - FCRBE, 2021.
- Godart, M.-F. 2020.** *ENVI-F437 Ecologie et cycles biogéochimiques*. s.l. : Université Libre de Bruxelles, 2020.
- Gouvernement wallon. 2018.** *Plan wallon des Déchets-Ressources*. 2018.
- Haris N., Gibbs D. 2021.** Global maps of twenty-first century forest carbon fluxes. 2021, Vol. 11.
- Holl K., Brancalion P. 2020.** Tree planting is not a simple solution. 2020, Vol. 368, 6491.
- inDUFed. 2022.** Le recyclage des vieux papiers. [En ligne] inDUFed, 2022. [Citation : 11 April 2022.] <https://www.indufed.be/fr/le-recyclage-des-vieux-papiers/>.
- International Energy Agency. 2013.** *CO2 emissions from fuel combustion, highlights*. Paris : s.n., 2013.
- Inventaire Forestier National. 2009.** *Biomasse forestière, populicole et bocagère disponible pour l'énergie à l'horizon 2020*. s.l. : Agende de l'Environnement et de la Maitrise de l'Energie, 2009.
- IPCC. 2014.** *Fifth Assessment Report, Working Group I, technical summary*. 2014.
- **2007.** *Forestry In Climate Change : Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report*. s.l. : Cambridge University Press, 2007.
- **2015.** *Paris Agreement*. Paris : Organisation for Economic Co-operation and Development/International Energy Agency, 2015.
- **2021.** *Sixth Assessment Report, Working Group I, technical summary*. 2021.
- **2019a.** Volume 4: Agriculture, Forestry and Other Land Use. *2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. 2019a.
- **2019b.** Volume 5: Waste. *2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. 2019b.
- ISSeP, (Institut scientifique de service public). 2010.** *Centres d'enfouissement technique, Qualité de l'air et émissions gazeuses sur et aux alentours des C.E.T.* 2010.
- Leeuwenburgh Fineer BV.** [En ligne] [Citation : 09 April 2022.] <https://www.leeuwenburgh.com/fr/qui-sommes-nous/>.
- Leskinen P., Cardellini G. 2018.** Substitution effects of wood-based products in climate change mitigation. *From Science to Policy* 7. 2018.
- Marbaix P., van Ypersele J.-P., 2018.** Empreinte carbone : De quelles émissions sommes-nous responsables et comment les réduire ? *Plateforme wallonne pour le GIEC*. 2018.
- Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire. 2015.** *Stratégie Nationale Bas Carbone, décryptage forêt bois biomasse*. 2015.
- Parlement européen. 2018.** DIRECTIVE (UE) 2018/851 DU PARLEMENT EUROPÉEN ET DU CONSEIL du 30 mai 2018 modifiant la directive 2008/98/CE relative aux déchets. 2018.
- Pattyn, F. 2021.** *ENVI-F405 Climat: Science et Politique*. s.l. : Université Libre de Bruxelles, 2021.
- PEFC. 2022.** PEFC. [En ligne] 2022. [Citation : 08 April 2022.] [pefc.org](https://www.pefc.org).
- Périn J., Hébert J. 2016a.** De nouvelles normes sylvicoles pour les futaies pures équiennes d'épicéa et de Douglas en appuie à la gestion de la forêt publique en Wallonie. *Forêt.Nature*. 139, 2016a.
- **2016b.** *Nouvelles normes sylvicoles pour les peuplements purs équiennes d'épicéa et de douglas*. s.l. : Service Public de Wallonie, 2016b.
- Petersen A.-K., Solberg B. 2005.** Environmental and economic impacts of substitution between wood products and alternative materials: A review of micro-level analyses from Norway and Sweden. *Forest Policy and Economics*. 2005, Vol. 7.
- Pichancourt J.-B., Fortin M. 2018.** A carbon accounting tool for complex and uncertain greenhouse gas emission life cycles. *Environmental Modelling and Software*. 107, 2018.
- Richard A., Zeller V., Degrez M., Thyssen N., De Boever L. 2015b.** *Life Cycle Assessment of Glued Laminated Timber - LCA at product level, ENECOBOIS project report 3.3 v.1*. Brussels : CTIB-ULB, 2015b.

- . **2015a.** *Life Cycle Assessment of Sawn wood - LCA at product level, ENECOBOIS project report 3.2 v.1.* Brussels : CTIB-ULB, 2015a.
- Rose Kelly B. 2016.** Seeing the forest for the trees: World's largest reforestation program overlooks wildlife. *Princeton University*. [En ligne] 7 Sept 2016. [Citation : 28 April 2022.] <https://www.princeton.edu/news/2016/09/07/seeing-forest-trees-worlds-largest-reforestation-program-overlooks-wildlife>.
- Rotor asbl. 2022.** Opalis. [En ligne] 2022. [Citation : 12 April 2022.] <https://opalis.eu/fr>.
- RotorDC. 2022.** [En ligne] Rotor Deconstruction srl, 2022. [Citation : 12 April 2022.]
- Service Public de Wallonie. 2021.** La Wallonie adopte la stratégie Circular Wallonia. [En ligne] 05 February 2021. [Citation : 15 April 2022.] <https://www.wallonie.be/fr/actualites/la-wallonie-adopte-la-strategie-circular-wallonia>.
- Thyssen N., De Boever L., Zeller V., Richard A., Degrez M. 2014.** *Wood Flow Analysis of the Walloon Region, ENECOBOIS project report 1 v.2.* Brussels : CTIB-ULB, 2014.
- UCM. 2013.** *Les déchets du secteur bois - Fiche Déchet Bois.* 2013.
- United Nations. 2022.** The Clean Development Mechanism. *United Nations Framework Convention on Climate Change*. [En ligne] 2022. [Citation : 28 April 2022.] <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-kyoto-protocol/mechanisms-under-the-kyoto-protocol/the-clean-development-mechanism>.
- ValBiom. Gazéification. La Biomasse en Wallonie.** [En ligne] [Citation : 11 April 2022.] <https://labiomasseenwallonie.be/>.
- . **2018.** *Panorama des filières bois-énergie et agrocombustibles en Wallonie.* 2018.
- Van der Lugt. 2020.** Tomorrow's Timber, Towards the next building revolution. s.l. : Jeroen van Oostveen, 2020.
- Vieillefosse A. 2006.** *La prise en compte de la forêt dans le protocole de Kyoto - Perspectives pour le post 2012.* s.l. : Ministère de l'écologie et du développement durable. Paris, 2006.
- Zell J., Kändler G. 2009.** Predicting constant decay rates of coarse woody debris—A meta-analysis approach with a mixed model. *Ecological Modelling*. 2009, Vol. 220, 7.
- Zeller V., Richard A., Degrez M., Thyssen N., De Boever L. 2015.** *Life Cycle Assessment of Medium Density Fibreboard - LCA at product level, ENECOBOIS project report 3.4 v.2.* Brussels : CTIB-ULB, 2015.