

## Valorisation du bois A et B en bois lamellé-collé et lamellé croisé

**Auteur :** Dalimier, Thibaud

**Promoteur(s) :** De Mil, Tom; 5714

**Faculté :** Gembloux Agro-Bio Tech (GxABT)

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

**Année académique :** 2021-2022

**URI/URL :** <http://hdl.handle.net/2268.2/14930>

---

### Avertissement à l'attention des usagers :

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

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

---

# Valorisation du bois A et B en bois lamellé-collé et lamellé croisé

**THIBAUD DALIMIER**

**TRAVAIL DE FIN D'ÉTUDES PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME DE  
MASTER BIOINGÉNIEUR EN GESTION DES FORÊTS ET DES ESPACES NATURELS**

**ANNÉE ACADEMIQUE 2021-2022**

**CO-PROMOTEURS: TOM DE MIL & THIERRY DESCAMPS**

© Toute reproduction du présent document, par quelque procédé que ce soit, ne peut être réalisée qu'avec l'autorisation de l'auteur et de l'autorité académique<sup>1</sup> de Gembloux Agro-Bio Tech.

Le présent document n'engage que son auteur.

---

<sup>1</sup> Dans ce cas, l'autorité académique est représentée par le(s) promoteur(s) membre du personnel(s) enseignant de GxABT.



# Valorisation du bois A et B en bois lamellé-collé et lamellé croisé

**THIBAUD DALIMIER**

**TRAVAIL DE FIN D'ÉTUDES PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME DE  
MASTER BIOINGÉNIEUR EN GESTION DES FORÊTS ET DES ESPACES NATURELS**

**ANNÉE ACADEMIQUE 2021-2022**

**CO-PROMOTEURS: TOM DE MIL & THIERRY DESCAMPS**

## Remerciements

Ce travail de fin d'étude n'aurait jamais pu être mené à bien sans l'aide de nombreuses personnes et organisations auxquelles je souhaite adresser mes remerciements.

Je tiens tout d'abord à remercier mes deux co-promoteurs, les Professeurs Tom DE MIL et Thierry DESCAMPS sans lesquels ce travail n'aurait jamais pu être accompli. Vous m'avez accompagné durant toute cette étude, depuis la phase d'analyse des conteneurs jusqu'à la réalisation des essais. Merci pour votre encadrement au combien précieux.

Je tiens à remercier Intradel et plus particulièrement Stéphanie DIEU pour m'avoir permis d'analyser les conteneurs et pour les informations partagées. Je remercie également Thomas YPERSIEL et Cédric GEERTS pour leur aide précieuse lors de l'analyse des conteneurs. Finalement, je remercie également le personnel d'intradel pour leur accueil et leur aide lors de l'analyse.

Je tiens à remercier le Centre wallon de Recherches agronomiques pour m'avoir accueilli au sein de leur établissement et tout particulièrement le Laboratoire de Technologie du Bois. Je remercie Lahcen HADIY et Yannick DELZANT qui m'ont aidé dans la réalisation des poutres et du panneau ainsi que pour le transport vers Mons. Je remercie également Cécile LESIRE pour m'avoir aidé lors des tests de résistance des plis externes et pour la détermination des essences des échantillons ainsi que pour les nombreux conseils.

Je remercie l'université de Mons et plus particulièrement, le personnel du département de mécanique des structures pour m'avoir aidé lors de la réalisation des essais.

Je remercie la société Soudal de m'avoir procuré les échantillons de colle nécessaires à cette étude.

Je remercie Aurore RICHEL, Arnaud MONTY, Benoit JOUREZ, Tom DE MIL et Thierry DESCAMPS qui ont accepté d'examiner ce travail.

Je remercie aussi toute ma famille pour leur soutien et en particulier, mon bon papa pour son travail de relecture.

## Résumé

La forte demande en matériaux tel que le bois contribue indéniablement à l'épuisement des ressources naturelles et au réchauffement climatique. Pour y remédier, nous devons tourner notre économie vers un modèle plus durable et circulaire en recyclant intelligemment nos déchets de bois. Cette étude se place dans cette perspective en valorisant les déchets de bois non traité (bois A) et traité non dangereux (bois B) en bois lamellé-collé (BLC) et en bois lamellé croisé (CLT) pour le secteur de la construction. Ces deux produits sont de plus en plus développés par l'industrie du bois, ils sont composés d'un assemblage de lamelles de bois qui permet d'uniformiser les défauts naturels du bois pour obtenir un matériau final avec des caractéristiques de résistance que même le bois massif ne peut garantir. De plus, ces produits rendent possible la production d'éléments structuraux de très grandes dimensions, sans avoir besoin de grands arbres et ainsi limiter le gaspillage. Plus particulièrement, ce travail s'est penché, d'une part, sur l'analyse des types de déchets de bois présents dans les conteneurs d'Intradel, et d'autre part, sur la fabrication de poutres en BLC et d'un panneau en CLT. Des essais de flexion simple ont également été réalisés pour déterminer leur résistance en flexion. Il en ressort qu'une partie non négligeable des déchets de bois (14,5 %) peut être valorisée pour la fabrication de ces produits et que leur résistance permet d'envisager une utilisation en construction.

Mots clés : bois, recyparc, recyclage, lamellé-collé, lamellé croisé, flexion

## Abstract

The high demand for materials such as wood is undeniably contributing to the depletion of natural resources and global warming. To remedy this, we need to turn our economy towards a more sustainable and circular model by intelligently recycling our timber waste. This study takes this objective into perspective by examining the process of converting untreated (A-wood) and non-hazardous treated (B-wood) wood waste into glued laminated timber (GLT) and cross laminated timber (CLT), which are used in the construction sector. These two products are increasingly developed by the wood industry. They are manufactured from layers of dimensional timber that allows the natural defects of the wood to be corrected to obtain a final material with mechanical characteristics that even solid wood cannot reach. In addition, these products make it possible to produce very big structural elements without the need for large trees, thus limiting waste. This work has specifically focused on the analysis of the types of wood waste present in Intradel containers, and on the manufacture of GLT beams and a CLT panel. Simple bending tests were also carried out to determine the bending strength. The results show that a significant proportion of wood waste (14.5 %) can be recycled to manufacture these products and that their strength makes them suitable for use in construction.

Key words: wood, container park, recycling, glulam, cross-laminated, bending

# Table des matières

1. Contexte général – État de l'art .....	1
1.1 Introduction .....	1
1.2 Enjeux du bois recyclé .....	2
1.3 Les différentes catégories (A, B, C) des déchets de bois.....	4
1.4 Propriétés importantes du bois.....	6
1.5 Le bois lamellé-collé (BLC) .....	8
1.6 Le bois lamellé croisé (CLT).....	9
1.7 Les grands types de panneaux dérivés du bois .....	11
2. Objectifs .....	13
3. Matériel et méthode .....	14
3.1 Analyse de 3 conteneurs de bois A et B issu des recyparcs d'Intradel.....	14
A) Matériel .....	14
B) Méthode.....	15
3.1.1 Photo-interprétation des images des conteneurs prises par drone.....	18
3.2 Réalisation de 4 poutres en bois lamellé-collé (BLC) et d'un panneau en bois lamellé croisé (CLT) .....	19
A) Matériel .....	19
B) Méthode.....	20
3.3 Réalisation des essais de flexion simple des poutres BLC et du panneau CLT .....	27
A) Matériel .....	27
B) Méthode.....	27
4. Résultats et discussion.....	31
4.1 Résultats et discussion de l'analyse des conteneurs de bois A et B issu des recyparcs d'Intradel.....	31
4.2 Résultats et discussion de la photo-interprétation des images des conteneurs prises par drone .....	34
4.3 Résultats et discussion des essais de flexion simple des poutres BLC et du panneau CLT.....	36
5. Recommandations et perspectives .....	42
6. Contribution personnelle.....	42
7. Conclusion .....	43
8. Bibliographie .....	44
9. Annexes.....	49

## Liste des figures

Figure 1. Évolution du bois A et B dans les recyparcs d'Intradel - source : Intradel.....	5
Figure 2. Évolution des déchets en bois non dangereux en Belgique – source : Eurostat... ..	5
Figure 3. Courbe contrainte - déformation .....	7
Figure 4. Image du contenu du conteneur A générée grâce aux photos prises par le drone DJI Air 2S.....	16
Figure 5. Grille de points réguliers posée sur l'image du contenu du conteneur B générée sur QGIS 3.10. ....	18
Figure 6. Proportions d'essences rencontrées dans les échantillons.....	20
Figure 7. Banc de flexion à 3 points (Instron 5582) .....	23
Figure 8. Schéma d'assemblage (vue de profil) : (a) panneau CLT (longueur : 1 m) et (b) poutres BLC (longueur : 1,5 m), en blanc : les plis externes (épicéa) et en gris : les plis internes .....	23
Figure 9. Fabrication du panneau CLT : (a)-(b) assemblage, collage et pressage des plis externes ; (c) assemblage des différents plis + gabarit ; (d) application de l'adhésif (Purocol) ; (e) pressage du panneau.....	24
Figure 10. Fabrication des poutres BLC : (a) mise en place ; (b) application de l'adhésif (Purocol) ; (c) pressage de la poutre .....	25
Figure 11. Finalisation du panneau et des poutres : (a) rafraîchissement du panneau ; (b) rabotage des poutres ; (c) produits finis .....	26
Figure 12. Schéma des essais de flexion à 4 points des poutres BLC .....	27
Figure 13. Schéma de l'essai de flexion à 3 points du panneau CLT (vue de profil) .....	28
Figure 14. Schéma de l'essai de flexion à 3 points du panneau CLT (vue de haut) .....	28
Figure 15. Pourcentage des types de produits en bois ainsi que leur partie valorisable par rapport au poids moyen (kg) du contenu des 3 conteneurs .....	31
Figure 16. Pourcentage de bois A, B, C dans les 3 conteneurs analysés .....	32
Figure 17. Pourcentage des types de produits en bois suite à la photo-interprétation et comparaison avec le pourcentage en fonction du poids moyen.....	34
Figure 18. Pourcentage des catégories de bois suite à la photo-interprétation des images des conteneurs d'Intradel prises par drone .....	35
Figure 19. Courbes charge – déflexion des essais de flexion simple des poutres BLC .....	36
Figure 20. Fractures et délamination à la charge maximale : (a) poutre 1 (19393 N) ; (b) poutre 2 (38643 N) ; (c) poutre 3 (42416 N) et (d) poutre 4 (26945 N) .....	37
Figure 21. État des poutres BLC après les essais de flexion simple.....	37
Figure 22. Courbes charge – déflexion de l'essai de flexion simple du panneau CLT .....	38

Figure 23. Fractures et délamination à la charge maximale du panneau CLT : (a-b) profil des deux côtés de 100 cm ; (c) face inférieure au niveau du point de chargement ..... 39

## Liste des tables

Table 1. Nombre d'échantillons de bois A et B en fonction de leur longueur et largeur ..	20
Table 2. Résultats des essais de flexion simple des poutres BLC et du panneau CLT .....	40
Table 3. Classes de résistance du bois lamellé-collé – source : NBN EN 14080.....	40

## Liste des annexes

Annexe 1. Échantillons numérotés et détecteur de métaux : Electrometer P610 (TS8) .....	49
Annexe 2. Données des essais de flexion simple (C18) grâce à l'Instron 5582.....	50
Annexe 3. Relevés de température et de l'humidité de l'air lors du collage et du pressage des différents produits .....	51
Annexe 4. Dispositif de l'essai en flexion simple des poutres BLC.....	52
Annexe 5. Dispositif de l'essai en flexion simple du panneau CLT .....	53
Annexe 6. Résultats de l'analyse des conteneurs de bois A et B issu des recypqrcs d'Intradel.....	54
Annexe 7. Pourcentage des types de produits en bois suite à la photo-interprétation des images du contenu des 3 conteneurs prises par drone .....	54
Annexe 8. Courbes charge – déflexion de l'essai de flexion simple de la poutre 1 .....	55
Annexe 9. Courbes charge – déflexion de l'essai de flexion simple de la poutre 2.....	55
Annexe 10. Courbes charge – déflexion de l'essai de flexion simple de la poutre 3.....	56
Annexe 11. Courbes charge – déflexion de l'essai de flexion simple de la poutre 4.....	56

# 1. Contexte général – État de l'art

## 1.1 Introduction

L'épuisement des ressources naturelles et le réchauffement climatique sont des problèmes urgents auxquels l'humanité doit faire face. Les conséquences du réchauffement sont de plus en plus visibles et évidentes. Ce phénomène principalement dû au développement des activités humaines a longtemps été ignoré. Néanmoins, aujourd'hui, il est démontré sans ambiguïté par les scientifiques et de plus en plus admis par l'opinion publique et les responsables politiques.

« Si nous ne changeons pas de toute urgence notre mode de vie, nous mettons en danger la vie elle-même. » Antonio Guterres (ONU)

« Une réduction immédiate des émissions de gaz à effet de serre est nécessaire si nous voulons stabiliser le climat. » Hoesung Lee (GIEC)

Les deux problèmes majeurs énoncés ci-dessus peuvent être causés, d'une part, par l'augmentation anormalement élevée des émissions de gaz à effet de serre dans l'atmosphère, et d'autre part, par l'augmentation démographique mondiale lié à un besoin de consommation croissant par habitant entraînant indéniablement une forte demande en matériaux dont le bois (Guinard, 2009 ; Alexandre, 2014 ; Fouquet, 1991). De plus, cette demande croissante de bois dans la construction est motivée par des décisions politiques et la recherche d'un habitat sain en adéquation avec les exigences environnementales (Flach & Frenette, 2002).

Par conséquent, il n'est pas irrationnable de penser que la demande en matériaux tel que le bois ne devrait qu'augmenter au cours des prochaines années et décennies. Cependant, beaucoup de gens l'oublient ou l'ignorent parfois mais les ressources sont bel et bien limitées sur terre. De ce fait, un changement radical de mentalité est nécessaire dès maintenant pour s'orienter vers une gestion plus durable des ressources et plus globalement vers une économie plus durable et circulaire.

Pour pouvoir orienter notre économie actuelle vers un modèle durable et circulaire, les bois déjà utilisés comme tous les autres matériaux de construction ne devront plus être transformés en déchets mais bel et bien recyclés et réutilisés.

En 2007, en Europe, le volume de bois récupéré (post-consommateur) a été estimé à 55,4 millions de m<sup>3</sup>, soit l'équivalent de 33,2 millions de tonnes. Un tiers a été déclassé et utilisé pour la fabrication de panneaux de particules, perdant ainsi les propriétés matérielles favorables du bois massif et un tiers a été brûlé pour la production d'énergie. La fraction restante qui est la plus importante (20,4 millions de m<sup>3</sup>) a été mise en décharge ou incinérée et n'a pas été utilisée dans l'U27 (Leek, 2010). En 2011, le projet européen DEMOWOOD a actualisé cette estimation à 40 millions de tonnes de déchets bois post-consommateur. Or, une bonne partie de ces produits ont encore de bonnes propriétés physiques et mécaniques pour être réutilisés comme matière première en construction et garantir un stockage du CO<sub>2</sub> plus long (Huybrechts & Engelborghs, 2021 ; Privat, 2019 ; Llana et al, 2020). Ce dernier point est d'autant plus important dans le contexte actuel de décarbonation de l'économie. De plus, l'utilisation de matériaux structurels en bois à la place de l'acier, du béton ou d'autres

matériaux de constructions à forte émissions est l'un des moyens le plus efficace pour réduire les émissions de CO<sub>2</sub> (Churkina et al., 2020 ; Kutnar & Muthu, 2016).

La construction en bois massif permet de construire des infrastructures de grandes dimensions et complexes (Hout Info Bois, 2012). Malgré l'hétérogénéité du matériau, le bois a des propriétés intéressantes sur lesquelles le concepteur d'un produit et/ou d'une construction peut jouer :

- Les propriétés mécaniques et physiques
- La durabilité
- Les propriétés thermiques
- Les propriétés électriques
- Les propriétés acoustiques

Dans cette première partie du travail, une attention toute particulière sera portée sur les enjeux du bois recyclé, les catégories de déchets de bois, les propriétés importantes du bois, le lamellé croisé (CLT) & le lamellé-collé (BLC), les grands types de panneaux dérivés du bois ainsi qu'une conclusion.

## 1.2 Enjeux du bois recyclé

La forêt est un véritable réservoir de carbone et participe au phénomène de puits de CO<sub>2</sub> ou puits de carbone (Pugh et al., 2019 ; Robert et Saugier, 2003). Cette fonction sera d'autant plus efficace si elle est gérée durablement et de façon dynamique. Par conséquent, le matériau et les produits en bois peuvent également être considérés comme des véritables réservoirs/puits de CO<sub>2</sub> durant une certaine période (Kutnar & Muthu, 2016). Celle-ci dépend du temps de vie qui peut être considéré depuis la phase d'exploitation jusqu'à la décomposition ou incinération du produit et elle peut durer de quelques jours (journaux) à plusieurs centaines d'années (bois de construction). De ce fait, plus cette période sera longue, plus le stockage sera long et meilleur ce sera pour l'environnement (Hout Info Bois, 2012 ; Goverse et al, 2001). Les produits en bois et plus particulièrement, les produits en bois à longue durée de vie, peuvent indéniablement contribuer à l'atténuation du changement climatique (Fischlin, 1996 ; IPCC, 1996, 2000 ; Matthews et al., 1996 ; Niles and Schwarze, 2001 ; Skog and Nicholson, 1998 ; Werner et al., 2006).

Le recyclage et/ou le surcyclage « upcycling » du bois prend donc tout son sens car il permet de prolonger davantage la période de stockage du carbone. Toutefois, il n'est évidemment pas question dans ce cas-ci, du recyclage du bois en bois énergie dans lequel le carbone ne sera bien entendu pas stocké mais bien émis. Dès lors, l'un des principaux buts de la valorisation du bois A et B en construction via les produits CLT et BLC est de prolonger la période de fixation du carbone dans le bois.

Le bois est un matériau très intéressant par rapport à d'autres tels que le béton ou l'acier car son recyclage et sa revalorisation peuvent se faire sans dommage pour l'environnement. En outre, en volume, le bois est la ressource matérielle renouvelable la plus importante. (Rowell, 2002).

En effet, en fonction des traitements subis par le bois pour sa première utilisation, il peut faire l'objet d'un recyclage :

- En bois énergie/combustible
- Dans l'industrie du papier
- Dans l'industrie du panneau et de la construction
- En compostage

Selon Sirkin et Ten Houten (1994), le bois a l'avantage d'être une ressource renouvelable comparé aux produits non-renouvelables qui sont indéniablement voués à un épuisement des stocks plus ou moins rapide et forcé. Néanmoins, si cette ressource n'est pas gérée de façon durable et dynamique, le bois sera également voué à disparaître. De plus, à l'échelle européenne, il a été montré à l'aide de travaux de projection qu'à l'avenir la demande des différents marchés utilisant la ressource bois pourrait dépasser les capacités des ressources forestières mobilisables (Mantau et al., 2010).

Le recyclage et le surcyclage du bois est donc une nécessité pour pouvoir subvenir à la demande croissante de cette ressource. Cependant, selon Privat (2019), la seule voie possible pour sa valorisation à grande échelle (hormis la production de bois énergie/ combustible) est le recyclage en panneaux de particules. Cette méthode ne permet pourtant pas de valoriser la totalité des déchets en bois de classe A et B du fait des différences de contamination en fonction des provenances. Il y a donc un manque cruel de débouchés au niveau industriel pour ce type de déchet. La valorisation du bois A et B en construction grâce à l'utilisation de panneaux à plis croisés et de bois lamellé-collé pourrait donc être une belle opportunité.

L'utilisation efficace des ressources est donc l'un des grands enjeux actuel. Il est même le concept central de la mise en cascade, qui est une utilisation séquentielle d'une certaine ressource à des fins différents (Tavzes et Kutnar 2012 ; Höglmeier et al. 2013 ; Vis et al., 2016). Cela signifie dans notre cas, qu'un même échantillon de bois est utilisé pour de multiples applications de haute qualité (stockage du carbone durant une plus longue durée), suivie d'une utilisation finale en bois énergie et l'émission de CO<sub>2</sub>.

Des projets Européens tels que CaReWood 2015, DEMOWOOD 2015 et FPS COST Action E31 2011 sur les déchets en bois ont notamment été passés en revue par Burnard et al. (2015). Ces projets démontrent qu'il existe un grand potentiel pour la valorisation et le recyclage du bois autres que la production de panneaux de particules et de bois énergie. De plus, de nombreuses solutions ont été mises en avant pour simplifier et automatiser le tri, la détection des contaminants et l'élimination de ceux-ci (DEMOWOOD 2012 ; DEMOWOOD 2013 ; Hasan et al. 2011).

Enfin, il y a également des enjeux réglementaires. De fait, l'Union Européenne s'est notamment fixée des objectifs ambitieux. Selon l'article 11 de la directive 2008/98/CE du parlement européen et du conseil relative aux déchets, depuis 2020, tous les états membres ont un objectif de 70 % de valorisation (recyclage, réemploi et autres systèmes de valorisation) de matière de déchets non dangereux dans le secteur de la construction et de la démolition. Le bois est donc bien évidemment soumis à cette directive.

### 1.3 Les différentes catégories (A, B, C) des déchets de bois

Le bois est un des matériaux les plus faciles à recycler. Pour ce faire, il faut naturellement trier les différents types de déchets de bois. Au niveau européen, la classification des déchets de bois n'est pas harmonisée (Cousin et al., 2017). Toutefois, la classification des déchets de bois comprend deux extrêmes (les bois non traités et les bois dangereux) et une ou deux classes intermédiaires en fonction du pays. Ces catégories sont définies par commodité d'usage par les gestionnaires des déchets ou réglementairement (Privat, 2019).

En Wallonie, il existe 3 catégories différentes de déchets bois utilisées par les professionnels mais sans fondement réglementaire précis :

- Ceux provenant de bois non traités (**bois A**) : c'est-à-dire non vernis, non peints et qui n'ont pas été en contact avec des matières dangereuses. Cela comprend notamment les bois de construction non traités (poutres, madriers, etc.), les palettes, les caisses et cagettes, le bois de fardage non traité, ...
- Ceux provenant de bois traités (**bois B**) : ça correspond à des déchets en bois traités avec des produits non dangereux, peints ou vernis. Ils proviennent surtout des portes, des meubles, des fenêtres, des panneaux, des bois de démolition exempt de gravats, ...
- Ceux provenant de bois traités avec des produits dangereux (**bois C**), les propriétés qui rendent les déchets dangereux sont listées à l'annexe III de la directive 2008/98/CE : ils comprennent tous les déchets de bois autoclavés et imprégnés de sels métalliques, traités à la créosote, contaminés. Par exemple, c'est le cas des traverses de chemins de fer, des poteaux téléphoniques ou électriques, des palissades en bois et des carports.

Les bois des catégories A et B sont tous deux recyclables et valorisables. Ceux de catégorie C ne sont pas recyclables car ils ont notamment subi des traitements chimiques (produit de préservation, colle, etc.) qui sont intimement liés avec le matériau et indissociables. Cette catégorie de déchets sont soit utilisés dans des fours de cimenteries ou incinérés dans des installations spécifiques. En outre, les déchets de bois C doivent être enlevés par des personnes agréés et doivent être stockés séparément des deux autres catégories (BMC environnement, 2021 ; Bois – Je Trie Dans Mon Entreprise, 2021 ; Bois – Paprec, 2020).

En ce qui concerne le bois A et B (post-consommateur), selon les chiffres rapportés par Intradel (Figure 1), une intercommunale qui regroupe 72 communes de la province de Liège comprenant 49 recyparcs et un recyparc mobile, la quantité de bois A et B est en augmentation ces 4 dernières années. En effet, une évolution de 25 954 T en 2018 à 29 629 T en 2021 a été observée. Ceci représente donc une opportunité en terme de valorisation. A l'heure actuelle, le bois présent dans les conteneurs d'Intradel est acheminé vers différents sous-traitants. En général, ils sont broyés et envoyés dans des chaudières industrielles. Cependant, une partie non négligeable pourrait être valorisée pour des utilisations plus nobles.

## Evolution du bois A et B dans les recyparcs d'Intradel

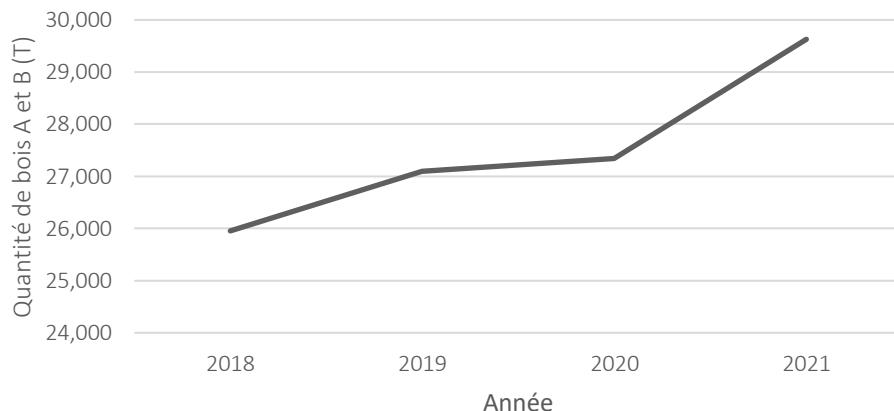


Figure 1. Évolution du bois A et B dans les recyparcs d'Intradel - source : Intradel

Au niveau national la tendance est également à la hausse, selon les chiffres rapportés par Eurostat (Figure 2), la quantité de déchets en bois non dangereux est également en augmentation ces dernières années. En effet, une évolution de 1 530 924 T en 2008 à 3 882 374 T en 2018 a été observée. La quantité a donc plus que doublé en 10 ans, ceci montre donc tout l'intérêt de revaloriser ce produit. Il est important de mentionner que cette estimation représente tous les déchets en bois non dangereux générés en Belgique et pas uniquement les déchets post-consommateur.

## Évolution des déchets en bois non dangereux en Belgique

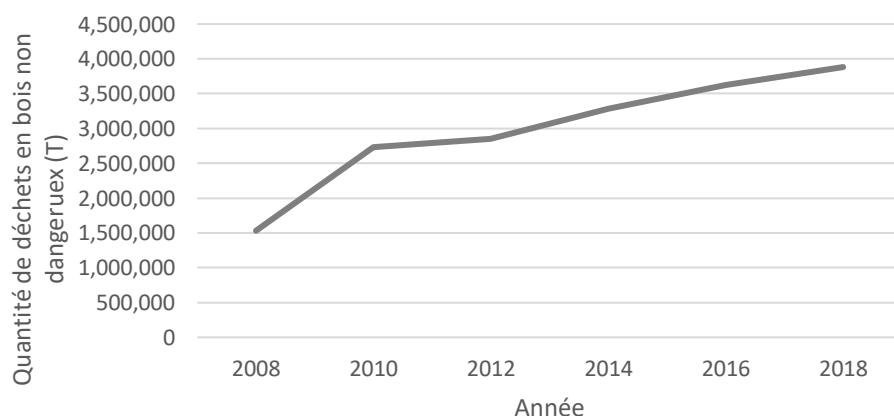


Figure 2. Évolution des déchets en bois non dangereux en Belgique – source : Eurostat

## 1.4 Propriétés importantes du bois

Comment parler du bois sans évoquer ses propriétés qui le rendent si unique. Dans, le cadre de ce travail, il est important de prendre en considération les éléments qui déterminent la qualité et la solidité d'un produit en bois et plus particulièrement de lamellé-collé et lamellé croisé (BLC & CLT). Ceux-ci sont bien évidemment les performances du matériau bois, la conception du produit et sa mise en œuvre. Nous allons donc nous concentrer sur les performances du bois grâce à ses atouts et ses propriétés mécaniques.

Tout d'abord, la qualité du bois dépend de facteurs génétiques et environnementaux. De ce fait, elle peut varier d'un arbre à un autre et parfois même au sein du même arbre (Dinwoodie, 2000). De plus, le bois est un matériau orthotrope, ce qui signifie que son anatomie est différente selon trois axes mutuellement perpendiculaires (longitudinal, radial et tangentiel). Le bois est donc un matériau anisotrope car ses propriétés physiques ne sont pas identiques dans toutes les directions. Par conséquent, les modifications dimensionnelles qui se produisent à la suite de changements de la teneur en humidité ne sont pas uniformes dans toutes les directions par rapport à l'axe de l'arbre (retrait tangentiel > retrait radial >> retrait longitudinal) (De Mil, 2021 ; Madsen, 1992 ; Walker, 1993).

Le bois est également un matériau hygroscopique, cela implique qu'il a la capacité d'absorber ou de perdre de l'eau en fonction de l'humidité ambiante. Ce phénomène se traduit par une dilatation ou une rétraction du bois en fonction du taux d'humidité de l'air et ceci peut porter préjudice aux caractéristiques mécaniques du bois (Green et al., 1994 ; Madsen, 1992 ; Navi & Heger, 2005 ; Walker, 1993). Pour certaines utilisations, le bois est donc séché pour notamment limiter les déformations dues à cette variation (De Mil, 2021).

Les propriétés du bois dépendent fortement de caractéristiques telles que la densité du bois, l'angle des microfibrilles, le bois de compression, la proportion de bois juvénile et la largeur des cernes. Cependant, la densité du bois est traditionnellement considérée comme le facteur le plus important. De plus, elle a un impact majeur sur le rendement, la qualité, la valeur des produits en bois et parce qu'elle peut être modifiée par l'amélioration génétique et les pratiques sylvicoles (Bamber et Burley, 1983 ; Zobel et van Buijtenen, 1989 ; Walker et Woollons, 1998).

Il y a principalement deux aspects en ce qui concerne les propriétés mécaniques du bois, la résistance à la rupture et la rigidité. La rigidité n'est pas équivalente à la résistance à la rupture. Ces deux aspects constituent les principales préoccupations de l'industrie de la construction (De Mil, 2021). La rigidité est principalement déterminée par l'angle des microfibrilles dans la deuxième couche de la paroi cellulaire (Cave, 1968, 1969 ; Cave et Walker, 1994 ; Walker et Butterfield, 1996 ; Lindstrom et al., 2002).

Afin de bien comprendre le comportement mécanique du bois, il faut plus particulièrement s'intéresser à la loi de Hooke qui exprime le lien de proportionnalité entre la contrainte (stress) et la déformation (strain) dans la zone élastique (Figure 3), cela signifie que l'objet reprend sa forme lorsque la contrainte est abaissée. Lorsque la limite de proportionnalité est dépassée, nous arrivons dans la zone plastique où la

déformation subsiste après arrêt de la contrainte. Enfin, si la contrainte augmente davantage, nous pouvons parvenir à ce qui est appelé le point de rupture.

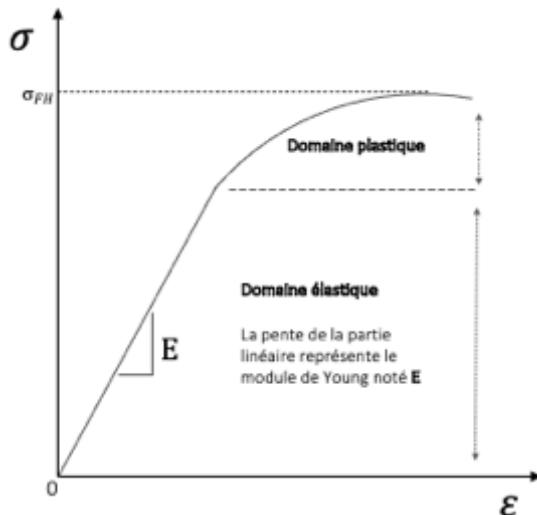


Figure 3. Courbe contrainte - déformation

Le comportement élastique du bois peut être décrit par le module de Young ou module d'élasticité ( $E$ ) établissant un lien de proportionnalité entre déformation ( $\epsilon$ ) et contrainte ( $\sigma$ ).

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon}$$

Le module d'élasticité ( $E$ ) s'exprime en mégapascal (MPa) ou en Newton par millimètre carré (N/mm<sup>2</sup>). Il est généralement admis qu'un bois de grande rigidité présente un module d'élasticité supérieure à 14 000 N/mm<sup>2</sup> et qu'un bois de faible rigidité présente un module d'élasticité inférieure à 10 000 N/mm<sup>2</sup>. (Hout Info Bois, 2012)

Le bois est également soumis à différents types de contraintes : traction, compression, cisaillement, flexion, fluage.

La force de traction ou tension (MPa ou N/mm<sup>2</sup>) tend à allonger la pièce sur laquelle elle est appliquée. Le bois est un matériau qui résiste très bien à la traction quand celle-ci est exercée parallèlement aux fibres. Si elle est exercée perpendiculairement aux fibres ce n'est pas le cas. Dans le cas d'un bois exempt de défaut (nœuds, pentes de fils importantes, fentes, etc.) la résistance en traction est toujours supérieure à celle en compression (De Mil, 2021 ; Rondeaux, 2021 ; Madsen, 1992 ; Walker, 1993).

La force de compression (MPa ou N/mm<sup>2</sup>), c'est l'inverse de celle de traction. C'est-à-dire que l'effort de compression tend à raccourcir la pièce de bois. Tout comme pour la force de traction, elle peut tout aussi bien être parallèle ou perpendiculaire aux fibres. Une fois de plus, du fait de sa structure orientée, le bois résiste mieux à l'effort de compression quand il est exercé parallèlement aux fibres. La résistance d'une pièce de bois à la compression est d'environ deux fois moins élevée

que celle observée en traction (De Mil, 2021 ; Rondeaux, 2021 ; Madsen, 1992 ; Walker, 1993).

Le cisaillement ou effort tranchant (MPa ou N/mm<sup>2</sup>) correspond au glissement des fibres les unes par rapport aux autres suite à l'effort auquel elles sont soumises. Comme son nom l'indique, il peut provoquer le cisaillement de la pièce en bois. Il est possible de distinguer le cisaillement longitudinal (parallèle aux fibres), le cisaillement transversal (perpendiculaire aux fibres) et le cisaillement roulant (peu commun et caractéristique des panneaux fléchis). La résistance au cisaillement longitudinal est plus faible que la résistance au cisaillement transversal et sera donc la seule considérée (De Mil, 2021 ; Rondeaux, 2021 ; Madsen, 1992 ; Walker, 1993).

L'effort de flexion fait flétrir la pièce de bois. La résistance en flexion est une résistance fictive découlant d'un comportement global lorsque les fibres sont à la fois en traction et en compression. Une pièce de bois telle qu'une poutre soumise à l'effort de flexion comprend des fibres tendues (partie inférieure), une fibre neutre (partie centrale) et des fibres comprimées (partie supérieure) (De Mil, 2021 ; Rondeaux, 2021 ; Madsen, 1992 ; Walker, 1993).

Le fluage est le phénomène physique qui provoque la déformation irréversible différée d'un matériau soumis à une contrainte constante, même inférieure à la limite d'élasticité du matériau, pendant une durée suffisante. Si une contrainte est appliquée sur le bois pendant très longtemps, alors la déformation ne partira pas entièrement lors de l'enlèvement de cette contrainte (De Mil, 2021 ; Rondeaux, 2021 ; Madsen, 1992 ; Walker, 1993).

Il faut bien entendu garder à l'esprit que les propriétés mécaniques énoncées ci-dessus peuvent être influencées par de nombreux facteurs dont il faut tenir compte lors du dimensionnement. Il faut donc prêter attention à la dimension de la pièce, le type de débit, sa masse volumique, les éventuels défauts et son taux humidité (De Mil, 2021 ; Madsen, 1992 ; Walker, 1993).

## 1.5 Le bois lamellé-collé (BLC)

Le bois lamellé-collé (BLC) ou glulam en anglais est une technique d'assemblage qui a été industrialisée au début du 20<sup>ème</sup> siècle (SNBL et Skogsindustrierna, 2007). Ce produit s'obtient par collage de plusieurs lamelles de bois d'une épaisseur égale ou inférieure à 45 mm dont le fil est parallèle. Les planches utilisées sont séchées pour amener le bois à un taux d'humidité allant de 10 à 15 % (Issa & Kmeid , 2005 ; Hout Info Bois, 2012 ; Nahal, 2011, SNBL et Skogsindustrierna, 2007). Ce taux va dépendre de l'utilisation finale du produit.

Le lamellé-collé est composé de lamelles de bois massif qui peuvent être de classes mécaniques différentes. Un grand nombre d'essences peut convenir pour ce produit telles que les essences résineux communément utilisées en structure (épicéa, mélèze, sapin, pin sylvestre et douglas), des essences feuillues comme le chêne, le châtaigner ainsi que des essences tropicales comme le merbau, l'afzélia, le moabi et le padouk (Hout Info Bois, 2012 ; Leloy, 2011).

Les dimensions couramment rencontrées (Hout Info Bois, 2012 ; Rondeaux, 2021) :

- Longueur jusqu'à 150 m
- Hauteur de 100 à 2500 mm
- Largeur de 60 à 210 mm

En ce qui concerne le principe de fabrication, après plusieurs étapes de sciage, les grumes sont sciées en lamelles. Elles sont par la suite, séchées ( $w<15\%$ ), triées et purgées de leurs défauts. Puis, les lamelles sont assemblées dans le sens du fil par leurs extrémités pour en faire un élément de plus grande longueur (aboutage). Pour cette étape, la société Stabilame située à Marienbourg utilise de la mélamine en guise de colle. Par ailleurs, selon Nathalie Lebrun (Responsable communications chez Stabilame), la résistance en traction du joint doit être au moins égale à la résistance hors du joint.

Dans un second temps, les inégalités sont enlevées et les faces sont aplaniées si nécessaire (rabotage). Par après, une phase d'encollage à lieu. Un adhésif est donc appliqué sur les faces des lamelles et celles-ci sont superposées dans le sens de la fibre du bois. Selon Hout Info Bois, la teneur en colle des BLC est inférieure à 3 % par  $m^3$ . Les adhésifs les plus courant pour les éléments de structure en bois BLC sont : Mélamine-Urée-Formol (MUF), Résorcine- Phénol-Formol (RPF)et Polyuréthane (PU) (Leloy, 2011 ; Nahal, 2011).

Ensuite, le tout est pressé avec cintrage éventuel et à posteriori, un deuxième rabotage a lieu. Une mise à dimension peut également être effectuée. Enfin, des traitements particuliers ou des finitions peuvent être appliqués afin d'obtenir la durabilité et/ou l'apparence voulue.

Le bois lamellé-collé a de nombreux avantages et atouts. Tout d'abord, cet assemblage permet d'uniformiser les défauts naturels du bois pour obtenir un matériau final aux propriétés moins variables et mieux contrôlées. Il permet également la production d'éléments structuraux de très grandes dimensions, sans avoir besoin de grands arbres et ainsi limiter le gaspillage. Enfin, le BLC permet la production d'éléments aux formes diverses et par conséquent de réaliser des structures en bois hors du commun. (Issa & Kmeid, 2005 ; De Mil, 2021 ; Nahal, 2011 ; Rondeaux, 2021 ; SNBL et Skogsindustrierna, 2007.)

Les usages de ce produit sont donc très variés telles que des grandes portées (bâtiments sportifs, industriels), des poutres à section et à inertie variables, des architectures d'intérieur et des menuiseries. (Hout Info Bois, 2012).

## 1.6 Le bois lamellé croisé (CLT)

Le bois lamellé croisé ou cross laminated timber (CLT) ou encore X-Lam en anglais est une technique d'assemblage qui date d'une vingtaine d'années. Tout comme le bois lamellé-collé c'est un produit innovant composé de plusieurs couches de lamelles. Toutefois, pour ce qui est du CLT les lamelles sont collées ou clouées entre elles en couches croisées à angle droit (Karacabeyli & Douglas, 2013). Le bois lamellé

croisé est généralement disposé en un nombre impair de couches, comme dans les configurations à 3, 5 ou 7. Dont l'épaisseur des lamelles varie généralement entre 12 et 45 mm (Bradner et al., 2016 ; Munandar et al, 2019).

Un grand nombre d'essences peuvent convenir pour ce produit et plus particulièrement les essences résineuses communément utilisées comme le douglas, l'épicéa, le pin sylvestre, le mélèze et le sapin (Hout Info Bois, 2012).

Les dimensions couramment rencontrées (Gustafsson et al., 2019 ; Hout Info Bois, 2012) :

- Longueur jusqu'à 30 m
- Largeur de 62,5 à 480 cm
- Épaisseur de 50 à 600 mm

Pour ce qui est du principe de fabrication, les grumes sont tout d'abord sciées en lamelles. Ensuite, elles sont séchées entre 10 et 15 %, triées et purgées de leurs défauts. Une phase de calibrage est donc réalisée. Puis, les lamelles sont utilisées pour réaliser des lits verticaux et horizontaux assemblés par clouage ou par encollage successifs. Si la dimension des lamelles n'est pas assez grande pour réaliser un panneau, une phase d'aboutage peut être nécessaire pour y arriver (l'adhésif utilisé par la société Stabilame pour cette étape est la mélamine). Le choix de la colle est un facteur clé pour obtenir une bonne qualité des produits lamellés croisés. En outre, les adhésifs couramment rencontrés pour le BLC sont également valables pour le CLT.

Dans un second temps, pour le système contrecollé, une phase de pressage et de stabilisation est réalisée. Par la suite, les éventuels inégalités et surplus de colle sont enlevées. Les faces sont également aplani si nécessaire (rabotage). Par après, des découpes et des entaillages peuvent être effectués. Enfin, tout comme pour le bois lamellé-collé, des traitements particuliers ou des finitions peuvent être appliqués afin d'obtenir la durabilité et/ou l'apparence voulue.

Les panneaux en bois à plis croisés (CLT) ont également de nombreux avantages et atouts. Tout d'abord, les performances mécaniques sont élevées et rendues isotropes grâce au croisement. En effet, à l'instar d'une couche individuelle de lamelle, l'application d'un adhésif entre les couches de lamelles permet de créer une section transversale composite dont les propriétés mécaniques sont plus élevées. De fait, grâce à cette technique d'assemblage la rigidité et la stabilité du panneau sont grandement augmentées dans toutes les directions. Elle permet donc une répartition uniforme des charges dans tout le panneau et par conséquent une capacité de charge importante (Karacabeyli & Douglas, 2013 ; Rondeaux, 2021 ; Supartini, 2012). Le CLT a également une bonne capacité d'isolation et de résistance au feu (Gustafsson et al., 2019). De plus, les avantages précédemment mentionnés pour le bois lamellé-collé sont également d'applications pour le bois lamellé croisé.

Suite à ces avantages, les usages de ce produit peuvent être très diversifiés telles que des toitures, des murs porteurs, des planchers et des cloisons. De plus, en raison d'une préfabrication en atelier, ce type de panneau permet un construction rapide et facile à assembler. (Gustafsson et al., 2019 ; Hout Info Bois, 2012 ; Rondeaux, 2021)

## 1.7 Les grands types de panneaux dérivés du bois

Outre les panneaux en bois massifs, d'autres grands types de panneaux à base de bois existent tels que (Hout Info Bois, 2012 ; Kutnar et Muthu, 2016) :

- Les panneaux de particules

Les panneaux de particules sont fabriqués à partir de particules de bois de différentes dimensions. Ces composantes sont liées au moyen de colle et le type d'adhésif varie en fonction de l'utilisation finale. Ils peuvent compter 1 à 5 couches de particules pressés à haute température (165 à 220 °C). Généralement, les couches internes sont constituées de particules plus grossières que les couches externes mais la transition peut être progressive. Par conséquent, la masse volumique des panneaux de particules n'est pas homogène en épaisseur, elle est plus élevée en surface.

- Les panneaux OSB

Le panneau OSB (Oriented Strand Board) est un type de panneau de particules qui est généralement élaboré à partir de 3 couches de particules de bois de taille déterminées. Les particules des couches extérieures sont alignées parallèlement à la longueur, tandis que les particules internes sont disposées au hasard ou perpendiculairement aux couches externes. Un adhésif est utilisé pour coller les lamelles ensemble et les panneaux sont pressés à haute température.

- Les panneaux contreplaqués

Les panneaux contreplaqués sont des panneaux rigides composés d'un nombre variable de couches de placage (généralement impaire). Les feuilles de placage d'une épaisseur variant de 0,6 à 4 mm sont assemblées et collées en alternance avec une rotation de 90°, ce qui confère au produit une grande stabilité dimensionnelle. L'ensemble est pressé à chaud sous haute pression. Les essences et le type d'adhésif utilisés varient en fonction de l'utilisation finale du panneau.

- Les panneaux LDF et MDF

Les panneaux LDF (Low-density fiberboards) et MDF (Medium-density fiberboards) sont composés de fibres de bois et d'adhésifs comme liant. Le tout est pressé à chaud sous haute pression de manière à obtenir un matériau isotrope. Les épaisseurs des panneaux varient de 1,8 à 60 mm. Après l'usinage, ces panneaux ont un aspect assez homogène et peuvent donc être immédiatement laqués ou peints.

- Les panneaux de type Isorel / Hardboard

Les panneaux de type Isorel / Hardboard sont également constitués de fibres de bois. Cependant, ceux-ci sont produits en pressant à chaud un matelas de fibres de bois humides. L'eau s'échappe lors de la compression sous le matelas, ce qui leur donne leur aspect gaufré. Les fibres se lient par feutrage et la lignine présente dans le bois joue le rôle de liant. Ce procédé permet d'obtenir des panneaux d'une épaisseur variant entre 1,8 et 8 mm.

Pour conclure, le bois est un matériau qui répond particulièrement bien aux grands enjeux auxquels l'humanité doit faire face, à savoir, l'augmentation anormalement élevée des émissions de gaz à effet de serre dans l'atmosphère (réchauffement climatique) et l'augmentation démographique mondiale liée à un besoin de consommation croissant par habitant, menant indéniablement à une forte demande en matériaux.

Le recyclage et la valorisation du bois en lamellé-collé (BLC) et/ou en cross laminated timber (CLT) a justement l'avantage de pallier à ces problématiques. En effet, ceci permet, d'une part, de subvenir à la demande croissante en matériau, et d'autre part, de prolonger davantage la période de stockage du carbone dans le bois et ainsi limiter le plus possible les émissions de CO<sub>2</sub> en construction.

En outre, le BLC et le CLT ont de multiples avantages et atouts pour le secteur de la construction. De fait, ceux-ci permettent d'uniformiser les défauts naturels du bois pour obtenir un matériau final aux propriétés moins variables et mieux contrôlées. Le produit a par conséquent des propriétés mécaniques plus intéressantes. De plus, ces produits rendent possible la production d'éléments structuraux de très grandes dimensions, sans avoir besoin de grands arbres et ainsi limiter le gaspillage. Finalement et non des moindres, ils sont préfabriqués en usine et permettent une construction nettement plus rapide comparé aux autres matériaux de construction habituels tel que le béton.

Néanmoins, un des inconvénients de l'utilisation du bois recyclé et plus particulièrement du bois A et B pour la fabrication de poutres en BLC et de panneaux CLT est l'utilisation de bois qui a été traité avec de la peinture ou du vernis (bois B). Il faut donc préalablement trier les bois A et B et vérifier que les traitements qu'ils ont subis n'empêchent pas ou ne compliquent pas trop fortement la bonne réalisation du produit.

Une étude de faisabilité et également de rentabilité devrait être faite dans le futur pour pouvoir le garantir. De surcroît, différents tests devraient être réalisés entre des produits BLC et CLT issus de bois A/B et neuf pour pouvoir caractériser leurs propriétés mécaniques et les comparer. De plus, l'un des enjeux majeurs actuellement pour que ce soit réalisable à grande échelle est le tri préalable des échantillons qui sont aptes à être valorisés (dimensions, propriétés mécaniques, etc.). Une partie de ces points vont donc être étudiés lors de cette étude.

Nous avons tendance à penser que l'unique source de bois est la forêt mais les infrastructures réalisées avec ce matériau renouvelable représentent également un stock non négligeable. Pour finir, il est important de souligner que le bois est une part de notre histoire et sans aucun doute une part de notre futur.

## 2. Objectifs

L'objectif de ce travail est d'évaluer l'intérêt de valoriser du bois A et B issu des conteneurs d'Intradel en construction grâce à la réalisation de 4 poutres en bois lamellé-collé (BLC) et d'un panneau massif à plis croisés (CLT). Pour ce faire, une attention toute particulière a été portée sur l'analyse des conteneurs (i) ainsi que les propriétés mécaniques des poutres et du panneau réalisés (ii).

- i. Trier et quantifier la proportion de bois A, B et C ainsi que les différents types de produit (panneaux de particules, planches, palettes, etc.) rencontrés dans les conteneurs de déchets en bois d'Intradel. Estimer également les proportions de bois A et B potentiellement valorisable pour la réalisation de poutres en bois lamellé-collé et de panneaux massifs à plis croisés.
- ii. Réaliser des essais de flexion simple pour déterminer le module de rupture en flexion statique (MOR), le module d'élasticité (MOE ou E) et la rigidité (EI) du panneau CLT ainsi que comparer ceux-ci avec d'autres études.

### 3. Matériel et méthode

La première étape sur laquelle il faut se focaliser avant d'envisager la valorisation et le recyclage/surcyclage de n'importe quel matériau est la source de celui-ci. Dans le cas de cette étude, une attention toute particulière a été portée sur le bois A et B issu des conteneurs des recyparcs d'Intradel. Comme mentionné précédemment, Intradel est une intercommunale qui regroupe 72 communes de la province de Liège comprenant 49 recyparcs et un recyparc mobile. 230 000 tonnes de déchets y sont déposés chaque année dont 29 629 tonnes de bois A et B pour l'année 2021.

Pour ce faire, une première phase d'analyse des conteneurs a été réalisée, un tri en fonction des catégories (bois A et bois B) et en fonction des types de produits (panneaux de particules, palettes, planches, etc.). De plus, chaque catégorie et type de produit ont été pesés pour estimer les proportions de chacun. Enfin, certains échantillons ont été récoltés.

Grâce aux échantillons récoltés 4 poutres en bois lamellé-collé (BLC) et un panneau en bois lamellé croisé (CLT) ont été confectionnés et des essais de flexion en laboratoire ont également été réalisés.

#### 3.1 Analyse de 3 conteneurs de bois A et B issu des recyparcs d'Intradel

##### A) Matériel

Pour mener à bien cette analyse sur le site de Biocentre d'Intradel à Grâce-Hollogne différents matériels sont nécessaires :

- 3 conteneurs de bois
- Un dynamomètre REMA type 04
- Un opérateur avec une mini pelle
- Des équipements de protection
- Une scie et une tronçonneuse STIHL
- Un humidimètre : Protimeter Timbermaster
- Un camion porte conteneur
- Une pesée
- Un drone DJI Air 2S
- Des sacs à gravats (big-bag)

## B) Méthode

Pour commencer, cette analyse s'est penchée sur les différents types de bois susceptibles d'être rencontrés dans les conteneurs d'Intradel. Pour ce faire, le guide de tri d'Intradel « RECYPARC GUIDE PRATIQUE » à la section « bois » a notamment été analysé. De surcroît, des échanges avec Madame Dieu, Gestionnaire études/R&D chez Intradel, ont permis de déterminer une première liste des différents produits en bois susceptibles d'être rencontrés.

Lors du tri des conteneurs, cette liste a permis de quantifier les proportions des différentes catégories de bois (A, B et C) en fonction des types de produits en bois (voir ci-dessous).

Bois A :

- Bois de charpentes et bois de menuiseries (ex : poutres non traitées, planches, portes en bois massif, escaliers en bois, plinthes, parquets sans colle, châssis de fenêtre non traités,...)
- Meubles en bois massif sans revêtement
- Palettes non peintes
- Caisses en bois
- Bobines de câbles
- Bois durs bruts (troncs)

Bois B :

- Bois de démolition (ex : coffrage de béton, latte et bois imprégné)
- Bois exotiques
- Panneaux stratifiés / contreplaqués (Multiplex)
- Panneaux de particules / OSB
- LDF / MDF
- Bois traités non dangereux / peints / vernis (ex : meubles de jardin, jouets, clôtures, ...)
- Isorel / Hardboard (ex : fond de caisse à fruit, dos de meubles)
- Morceaux de petites dimensions et cassés (dominance de bois B)

Bois C :

- Bois autoclavés et imprégnés de sels métalliques, traités à la créosote (ex : traverses de chemin de fer, poteaux téléphoniques)

Autres :

- Plastiques, métaux, etc.

Par la suite, la phase d'analyse sur le site de Biocentre d'Intradel à Grâce-Hollogne a pu commencer. Trois conteneurs issus de communes différentes ont été mis à disposition et ceux-ci ont été analysés indépendamment. Pour cela, l'analyse s'est déroulée en 5 grandes étapes :

### **1. Renversement du conteneur et prise de photos par drone**

Tout d'abord, le camion chargé a été pesé pour connaître le poids total (conteneur rempli). Puis, le camion porte conteneur a renversé le contenu dans une zone préalablement dégagée pour l'analyse. Le camion à vide a de nouveau été pesé pour déterminer la tare. La différence des deux pesées a ainsi permis de connaître le poids du contenu. Après coup, le conteneur vide a été déposé à proximité du contenu. Ensuite, un opérateur muni d'une mini pelle a grossièrement étalé le contenu sur toute la zone dédiée à cet effet. Ceci a permis de mieux visualiser les différentes composantes.

A ce stade, les manipulations ont été stoppées momentanément pour pouvoir effectuer le survol du contenu par un drone DJI Air 2S. Avant de faire décoller le drone, des cibles codées détectables automatiquement par Metashape ont été placées aux quatre coins du contenu et les distances entre chaque cible ont été mesurées afin d'optimiser et évaluer la qualité géométrique du modèle construit et des mesures (volume et longueur) réalisées au sein de celui-ci.

Suite à cette étape, le survol du contenu grâce au drone a eu lieu. Plus précisément, des lignes de vol parallèles entre elles, à distance égale l'une de l'autre et à une altitude constante ont été réalisées. À intervalles réguliers des photos ont été prises et sous différents angles pour pouvoir reconstituer une image de l'ensemble du contenu (Figure 4).



Figure 4. Image du contenu du conteneur A générée grâce aux photos prises par le drone DJI Air 2S

## **2. Triage des différents types de produits**

La zone d'analyse a été divisée en sous-zones. Chaque sous-zone correspondait à un type de produit en bois particulier (voir liste), exemple : une zone pour les panneaux de particules/ OSB ; une zone pour les palettes ; une zone pour bois traités non dangereux / peints / vernis ; etc. Une fois les sous-zones déterminées, chaque produit en bois a été trié et placé dans la sous-zone lui correspondant.

## **3. Tonnage des différents types de produits en bois et estimation de la proportion de bois valorisable pour la réalisation de poutres en bois lamellé-collé (BLC) et d'un panneau massif à plis croisés (CLT).**

En fonction de la quantité et du volume de chaque type de produit, des sacs à gravats (big-bag) ont été remplis. Ensuite, à l'aide du dynamomètre REMA type 04 et d'une mini pelle pour soulever chaque big-bag, le poids des différents types de produits a pu être mesuré.

Lorsque la quantité et/ou le volume d'un type de produit fut trop conséquent (ex : panneaux de particules / OSB), celui-ci a été chargé dans le conteneur pour par la suite passer à la pesée. Vu que le poids à vide a été déterminé précédemment, le tonnage des types de bois nécessitant un conteneur a pu être déterminé.

A posteriori, une estimation de la proportion de bois valorisable pour la réalisation de poutres en bois lamellé-collé (BLC) et d'un panneau massif à plis croisés (CLT) a été effectuée. Pour ce faire, elle s'est basée sur les dimensions des éléments présents pour chaque type de produit (minimum 10 x 50 x 400 mm) et l'état de ceux-ci (traitements, pourriture, forme). De plus, l'estimation a été calculée en fonction de la moyenne des estimations de 3 personnes différentes.

## **4. Sélection des échantillons et prise d'humidité**

Certains échantillons ont été sélectionnés et récupérés. La sélection s'est faite sur des échantillons d'une certaine dimension (minimum 10 x 50 x 400 mm) et ayant subi le moins de traitements possibles (facilité d'usinage). L'humidité a également été mesurée sur 10 produits en bois différents en utilisant un humidimètre électrique à résistance en suivant la norme NBN EN 13183-2 :2002. L'humidité variait de 10,1 % à 22 %.

## **5. Rechargement du conteneur**

Finalement, le tout a été rechargé dans le conteneur à l'aide d'une mini pelle puis rerempli et pesé suite à l'analyse et à la sélection de certains échantillons.

### 3.1.1 Photo-interprétation des images des conteneurs prises par drone

Comme mentionné au point 3.1, des images du contenu de chaque conteneur analysé ont pu être générées grâce à des photos prises par un drone. Par la suite, une photo-interprétation de ces images a été effectuée sur QGIS 3.10 grâce à l'extension Pintmap 2.0.

Pour ce faire, une grille de points réguliers a été posée sur chaque image (Figure 5). La grille de points a été limitée au contenu du conteneur constituant chaque image. Le nombre de points de la grille a évidemment fluctué en fonction de l'aire du contenu (489 points pour le conteneur 1, 423 points pour le conteneur 2 et 433 points pour le conteneur 3). Un espacement de 50 cm a été fixé entre chaque point de la grille (grille de points de 50 cm de côté).

Chaque point de la grille a ensuite été photo-interprété à l'aide de l'extension Pintmap 2.0. Celle-ci a permis de classifier chaque point en fonction du type de produit en bois lui correspondant (voir liste 3.2, p15). Une fréquence relative pour chaque type de produit en bois a ainsi pu être déterminée.



Figure 5. Grille de points réguliers posée sur l'image du contenu du conteneur B générée sur QGIS 3.10.

### 3.2 Réalisation de 4 poutres en bois lamellé-collé (BLC) et d'un panneau en bois lamellé croisé (CLT)

#### A) Matériel

- Des échantillons/planches en bois A et B
- Des poutres d'épicéa neuves
- Un mètre ruban
- Un pied à coulisse numérique : Mitutoyo Absolute Digimatic
- Un détecteur de métaux : Electrometer P610 (TS8)
- Un humidimètre : Protimeter Timbermaster
- Un enregistreur de données de température et d'humidité (logger) : EBI 20-TH1
- Une dégauchisseuse : Danckaert Bruxelles
- Une raboteuse : Casadei R63h3
- Une panneautuseuse : Robland Z320
- Une scie radiale : Dewalt Radial Arm Saws
- Colle PU (Purocol – Soudal)
- Un pistolet à colle
- Une presse manuelle à panneau
- Une presse hydraulique : Gasolin Giorgio ST SA
- Une ponceuse excentrique : Festool ETS 150/3 EQ

## B) Méthode

Premièrement, des échantillons de bois A et B issus des conteneurs d'Intradel ont été acheminés au Laboratoire de Technologie du Bois à Gembloux. Chaque échantillon a été numéroté et leurs dimensions (épaisseur, largeur et longueur) ont été mesurées (Table 1). Ceci a permis d'avoir un premier aperçu de la quantité de bois récupérée.

Table 1. Nombre d'échantillons de bois A et B en fonction de leur longueur et largeur

Largeur (cm)	Longueur (cm)			Total
	46,3 à 49	50 à 93,5	119 à 166	
6,5 à 9,9	0	40	22	62
10 à 18,2	9	67	4	80
Total	9	107	26	142

Un total de 142 échantillons a donc été récupérés et ceux-ci ont une épaisseur qui varie de 16 à 27 mm. De plus, 7 essences sont présentes dont une grande majorité d'épicéa/ sapin blanc (Figure 6).

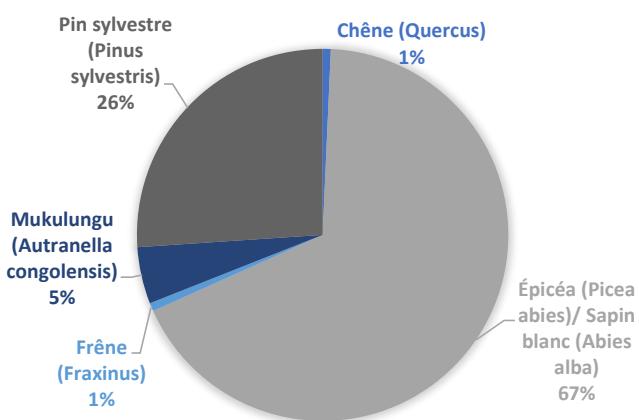


Figure 6. Proportions d'essences rencontrées dans les échantillons

Par la suite, différentes étapes ont été mises en place pour réaliser un panneau à plis croisé et des poutres en bois lamellé-collé :

### 1. Purifier les échantillons d'éventuelles composantes métalliques (vis et clous) + vérification grâce à un détecteur de métaux : Electrometer P610 (TS8)

Les éventuels vis, clous ou agrafes présents sur/dans les échantillons ont été enlevés. De plus, les 142 échantillons ont été étalés sur une dalle de béton et une vérification a été réalisée grâce à un détecteur de métaux « Electrometer P610 (TS8) » pour s'assurer qu'aucune composante métallique ne subsistait dans ceux-ci. (Annexe 1)

## **2. Standardisation des échantillons et des planches d'épicéa**

Pour faciliter la réalisation du panneau et des poutres, les échantillons ont été standardisés. Les échantillons de bois A et B constituent les plis internes du panneau et des poutres. Pour ce qui est des plis externes, des planches d'épicéa (38x100x2100 mm) issus de la faculté de Gembloux Agro-Bio Tech ont été utilisées.

Les dimensions standardisées des échantillons destinés au panneau sont : 14 x 66 x 505 mm (épaisseur x largeur x longueur)

Les dimensions standardisées des échantillons destinés aux poutres sont : 14 x 66 x 505 mm & 14 x 75 x 505 mm

Pour ce faire, les deux faces de tous les échantillons ont tout d'abord été rabotées à une épaisseur de 14 mm. Ensuite, ceux-ci ont été déalignés et sciés à l'aide d'une panneautuse et d'une scie radiale pour obtenir les dimensions finales.

Au final, 106 échantillons ont été standardisés pour le panneau et 71 pour les poutres.

Concernant les plis externes et donc les poutres d'épicéa, leurs dimensions ont également été standardisées :

- 25 x 100 x 1050 mm pour le panneau (épaisseur x largeur x longueur)
- 25 x 65 x 1515 mm & 25 x 75 x 1515 mm pour les poutres

REMARQUE: les échantillons ont été surdimensionnés comparé aux dimensions finales du panneau qui sont de 8,4 x 99 X 100 cm et des poutres de 6 x 12 x 150 cm (2) & 7 x 12 x 150 cm (2). Ce surdimensionnement permet après collage et pressage d'avoir une marge pour le rabotage et le ponçage. Ceci est nécessaire pour obtenir un produit fini sans surplus de colle.

## **3. Conditionnement des échantillons standardisés**

Les échantillons standardisés ont été conditionnés dans une chambre hermétique à une température de 20 °C ( $\pm 2$  °C) et à une humidité relative de 65 % ( $\pm 5$  %). Ceci correspond à une teneur en humidité de 12 % pour la plupart des essences. Ce taux est une exigence pour réaliser certains tests tels que la détermination de la classe de résistance.

## **4. Vérification de la classe de résistance (minimum C18) des plis externes/les poutres d'épicéa standardisées**

Pour des structures en bois selon le STS 04, la qualité du bois doit satisfaire au minimum à une classe de résistance C16. Dans notre cas par sécurité, les plis externes doivent au minimum avoir une classe de résistance C18.

Selon la norme NBN EN 338, un bois résineux a une classe de résistance C18 si suite à un essai de flexion sur chant, il résiste à 18 N/mm<sup>2</sup>. Pour réaliser ces essais de flexion

simple sur chant, la norme NBN EN 408 n'a pas pu être suivie car les installations disponibles à la faculté de Gembloux Agro-Bio Tech et au Laboratoire de Technologie du Bois ne l'ont pas permis. Nous avons cependant eu accès à la machine d'essais Instron 5582 qui permet notamment de réaliser des essais de flexion simple sur un banc de flexion à 3 points (Figure 7). De ce fait, pour s'assurer que les poutres d'épicéa aient au minimum une classe de résistance C18, des essais de flexion simple ont été réalisés en suivant la norme NBN 225 à l'exception des dimensions des éprouvettes d'essais qui s'en écartaient.

La teneur en humidité des échantillons standardisés prévus pour les plis externes a été mesurée à l'aide d'un humidimètre électrique à résistance en suivant la norme NBN EN 13183-2:2002. Ils ont également été soigneusement numérotés, mesurés et pesés.

Chaque échantillon standardisé prévu pour les plis externes du panneau (25 x 100 x 1050 mm) et des poutres (25 x 75 x 1515 mm) est ensuite placé sur un banc de flexion de manière à ce que la charge soit appliquée parallèlement aux cernes du bois. Une fois l'échantillon placé, une charge lui est appliquée à la moitié de sa longueur. Cette charge augmente de manière constante (20 N/s) jusqu'à arriver à une charge correspondant à une C18 (18 N/mm<sup>2</sup>), P1 (pour les échantillons du panneau) et P2 (pour les échantillons des poutres). Une fois que l'échantillon a résisté à cette charge, il est considéré comme une poutre d'épicéa qui a au minimum une classe de résistance C18 (données en Annexe 2).

Les charges P1 et P2 ont été déterminées comme suit (NBN 225) :

$$P = \frac{R2ba^2}{3l}$$

Où,

P est la charge finale appliquée en flexion, en kg ;

R est la tension, correspondant à une C18, 18 N/mm<sup>2</sup> ou 183,549 kg/cm<sup>2</sup>;

b est la largeur de l'échantillon, en cm (2,5 cm pour le panneau et la poutre) ;

a est la hauteur de l'échantillon, en cm (10 cm pour le panneau et 7,5 cm (7,6) pour la poutre) ;

l est la distance entre appuis, en cm (89 cm pour le panneau et 120 cm pour la poutre).

Par conséquent, P1 = 343,72 kg ou 3371,94 N et P2 = 147,25 kg ou 1444,49 N



Figure 7. Banc de flexion à 3 points (Instron 5582)

## 5. Assemblage et collage des poutres et du panneau

Les poutres et le panneau ont tout d'abord été assemblés (Figure 8) sans collage pour vérifier le bon agencement des différents échantillons standardisés, si nécessaire ceux-ci ont été légèrement réajustés. Une fois cette vérification terminée, le collage (300 g de colle par m<sup>2</sup>) et le pressage (15 bar) a eu lieu.

Une colle PU (Purocol - Soudal) a été utilisée pour effectuer les différents collages. C'est une colle mono-composante de construction à base de polyuréthane qui se polymérise grâce à l'humidité (humidité de l'air ou du matériau). De plus, elle a un pouvoir remplissant (intumescence) et est résistante à l'eau, de classe D4 (EN 204). Le temps ouvert est de 30 min et un pressage d'au moins 3 h est recommandé. Une pression de 0,5 N/mm<sup>2</sup> est conseillée pour les résineux et la température d'application peut varier entre 5 et 35 °C. Par ailleurs, la teneur en humidité de chaque lamelle durant le collage doit être comprise entre 8 et 15 % (NBN EN 14080).

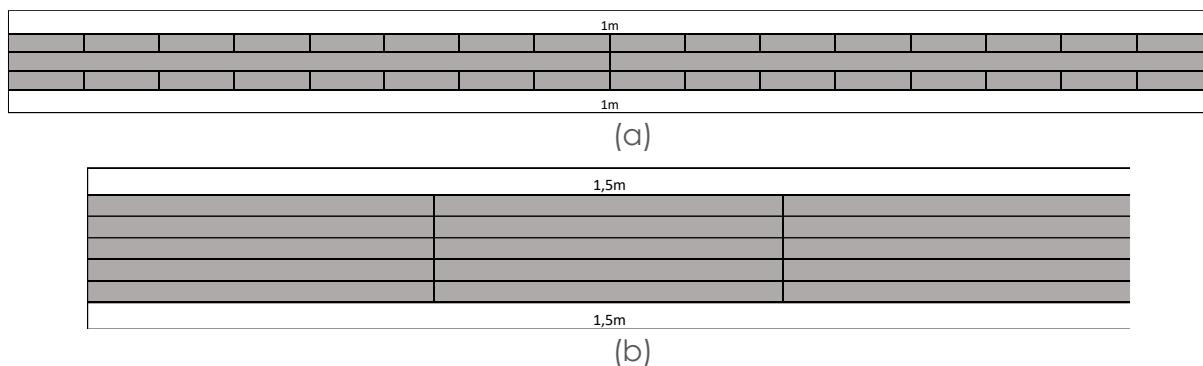


Figure 8. Schéma d'assemblage (vue de profil) : (a) panneau CLT (longueur : 1 m) et (b) poutres BLC (longueur : 1,5 m), en blanc : les plis externes (épicéa) et en gris : les plis internes

## 5.1 Assemblage et le collage du panneau CLT

Dans un premier temps, les plis externes ont été réalisés séparément. Le résultat final étant un panneau d'environ 1 m<sup>2</sup>, 4 x 5 planches d'épicéa ont été collées sur la tranche en alternant l'orientation des cernes pour chaque planche et pressées à 15 bar (1,5 N/mm<sup>2</sup>) pendant 3h30 (Figure 9a). Ensuite, chaque morceau a été raboté à 20 mm d'épaisseur. Pour finir, 2 fois 2 parties de 5 planches ont été collées entre elles et pressées à 15 bar. Les plis externes sont ainsi prêts pour le collage du panneau (Figure 9b).

Deuxièmement, le panneau a été assemblé sans colle et un gabarit a été confectionné pour faciliter le collage. Un fois cette étape réalisée, le collage du panneau a eu lieu. Plus précisément, chaque pli a été collé les uns par rapport aux autres et le tout a été pressé grâce à la presse à panneau manuelle durant 48h (Figure 9). Lors du collage et pressage, la température et l'humidité de l'air ont été mesurées à l'aide du logger EBI 20-TH1 (Annexe 3).



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

Figure 9. Fabrication du panneau CLT : (a)-(b) assemblage, collage et pressage des plis externes ; (c) assemblage des différents plis + gabarit ; (d) application de l'adhésif (Purocol) ; (e) pressage du panneau

## 5.2 Assemblage et collage des poutres BLC

Les 4 poutres ont été assemblées sans colle en alternant l'orientation des cernes de chaque échantillons et en vérifiant l'agencement de ceux-ci. Ensuite, chaque couche de lamelles a été collée les unes par rapport aux autres et le tout a été pressé à l'aide d'une presse hydraulique à 15 bar pendant 3h30 (Figure 10). Lors du collage et pressage, la température et l'humidité de l'air ont été mesurées à l'aide du logger EBI 20-TH1 (Annexe 3).

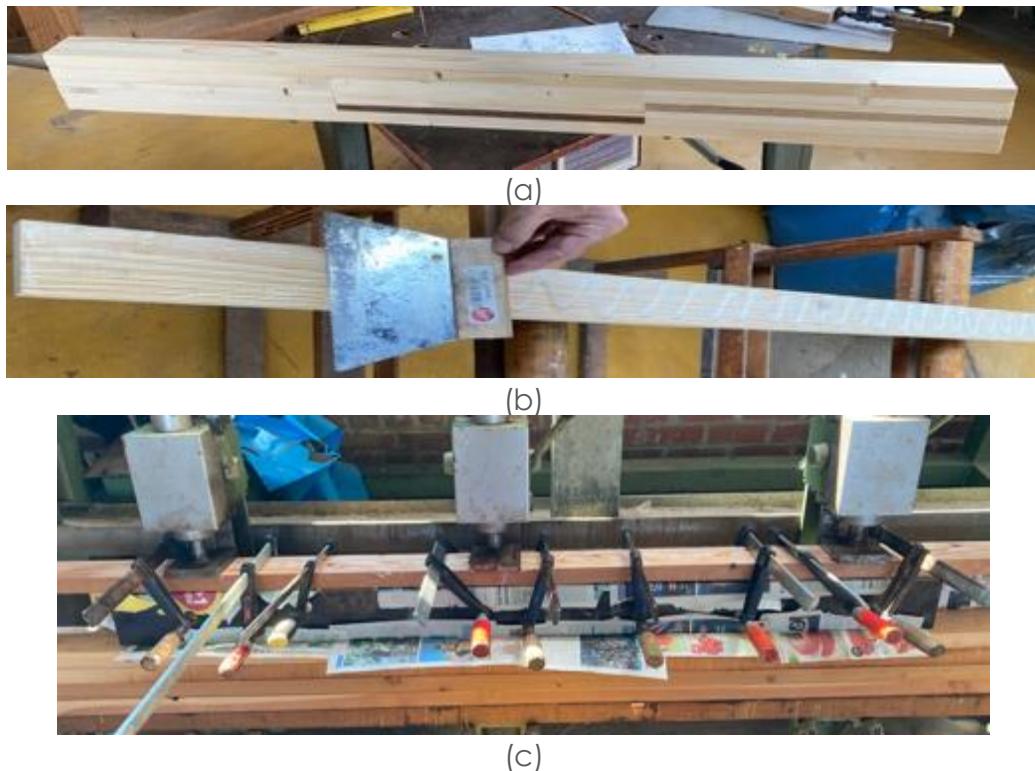


Figure 10. Fabrication des poutres BLC : (a) mise en place ; (b) application de l'adhésif (Purocol) ; (c) pressage de la poutre

## 6. Rabotage, rafraîchissement et ponçage du panneau CLT et des poutres BLC

Afin d'éliminer le surplus de colle et mettre à dimensions le panneau CLT et les 4 poutres BLC, ceux-ci ont été rabotés, rafraîchis à l'aide de la panneautuse et poncés avec la ponceuse excentrique Festool. Suite à ces dernières étapes, le panneau CLT et les 4 poutres BLC sont terminés (Figure 11).

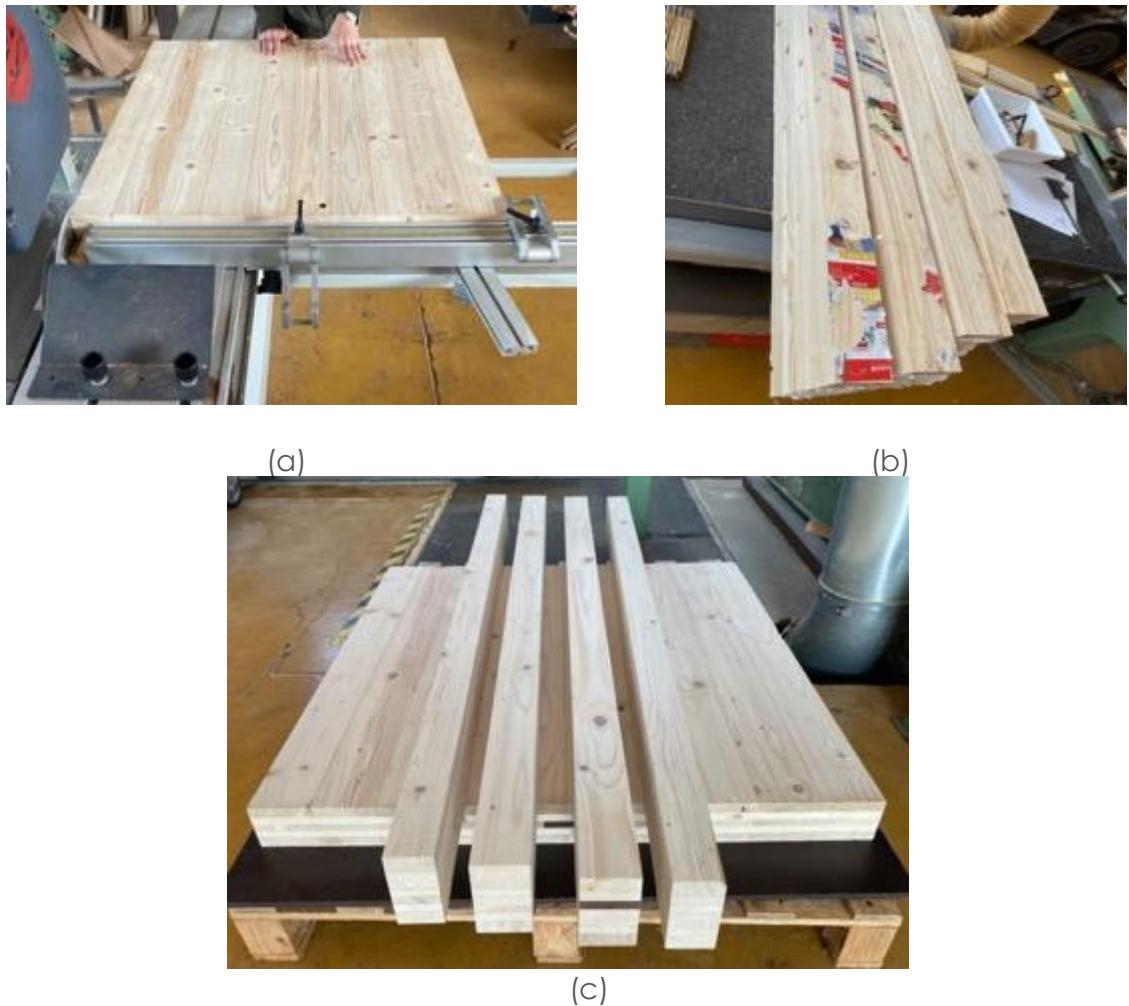


Figure 11. Finalisation du panneau et des poutres : (a) rafraîchissement du panneau ; (b) rabotage des poutres ; (c) produits finis

### 3.3 Réalisation des essais de flexion simple des poutres BLC et du panneau CLT

#### A) Matériel

- Une machine d'essais de flexion simple à 4 points : TIRAtest 28300
- Un banc d'essais pour panneau (3 points)
- Des capteurs de déplacement magnétiques LVDT
- Un humidimètre : Protimeter Timbermaster
- Un mètre
- Nikon D850
- Un trépied

#### B) Méthode

Les 4 poutres BLC et le panneau CLT ont été acheminés au « Department of Structural Mechanics - Timber Research Group » à l'université de Mons pour réaliser des essais de flexion simple.

La teneur en humidité des poutres et du panneau a été mesurée en utilisant un humidimètre électrique à résistance en suivant la norme NBN EN 13183-2 :2002. Ceux-ci ont également été numérotés et pesés préalablement.

La figure 12 et l'annexe 4 montrent le schéma et le montage de l'essai de flexion à 4 points des poutres BLC. La charge a été appliquée en deux points distants de 460 mm par une machine d'essai universelle (TIRAtest 28300) avec 3 capteurs de contrôle du déplacement. La valeur de cette charge augmente de manière constante jusqu'à la rupture des poutres, pour la première poutre, une vitesse de 7 KN/min a été fixée et celle-ci a été réajustée à 5 KN/min pour les 3 autres.

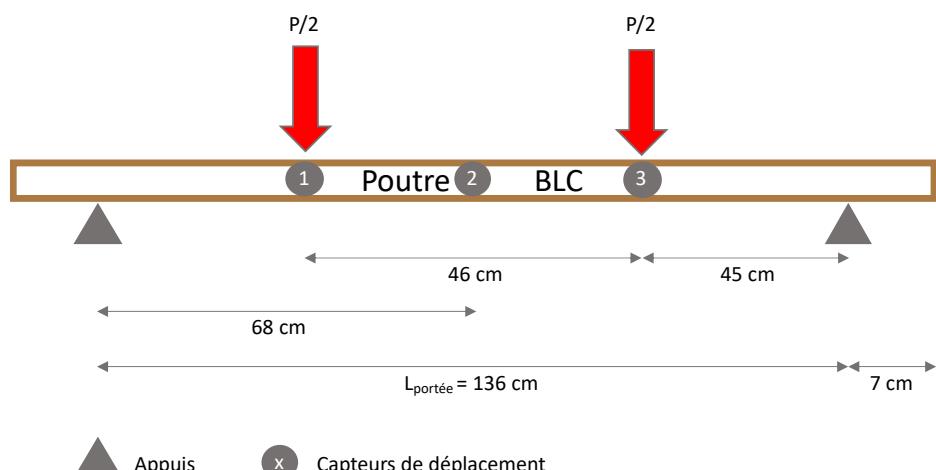


Figure 12. Schéma des essais de flexion à 4 points des poutres BLC

Les figures 13, 14 et l'annexe 5 montrent le schéma et le montage de l'essai de flexion à 3 points du panneau CLT. La charge a été appliquée à mi-portée par une machine d'essai propre à l'université de Mons avec 5 capteurs de contrôle du déplacement. La charge augmente jusqu'à la rupture du panneau.

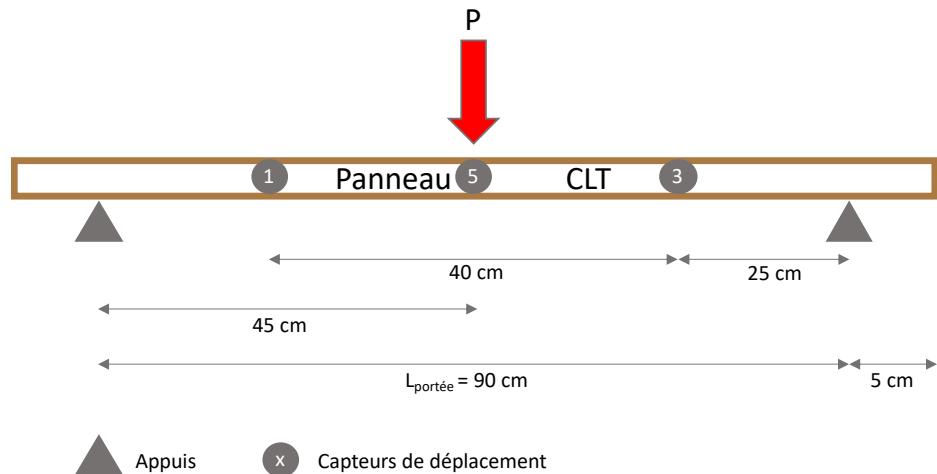


Figure 13. Schéma de l'essai de flexion à 3 points du panneau CLT (vue de profil)

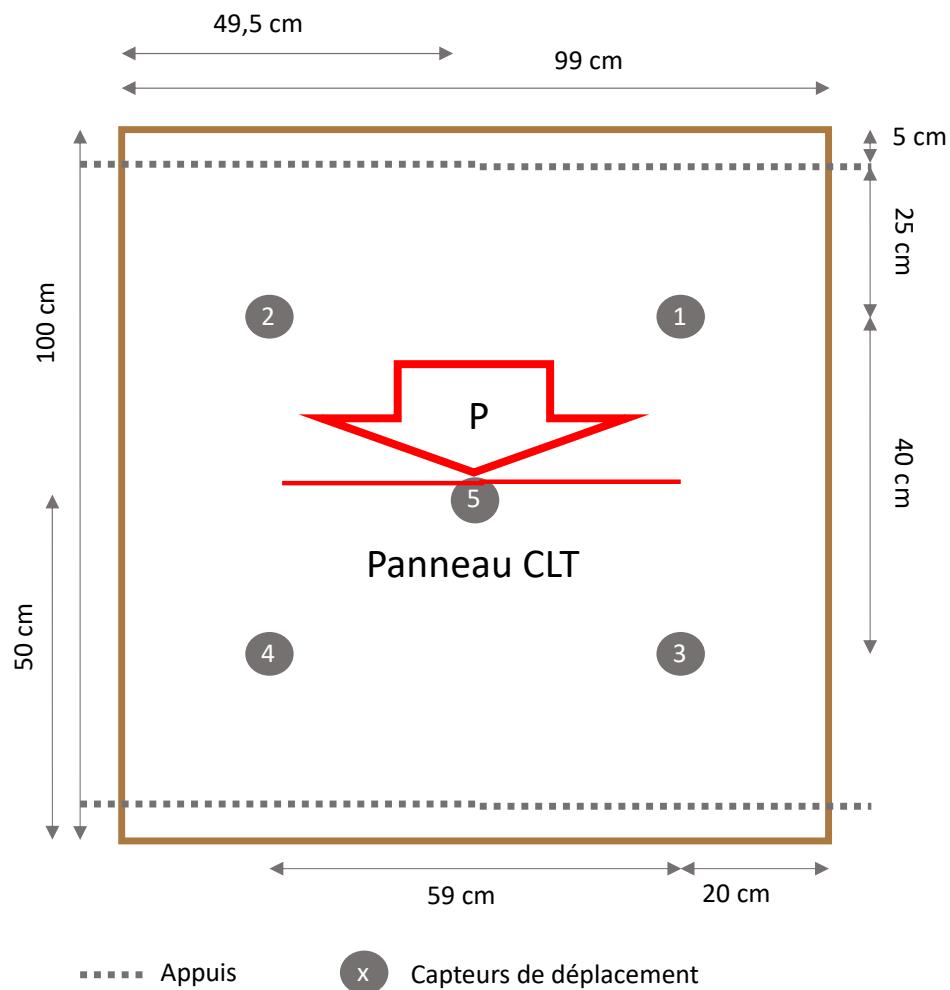


Figure 14. Schéma de l'essai de flexion à 3 points du panneau CLT (vue de haut)

Parallèlement à chaque essai, un appareil photo/caméra « Nikon D850 » a été installé sur un trépied à proximité pour filmer et mettre en évidence les faiblesses des poutres et du panneau jusqu'à la rupture. Antérieurement, une grille de points (2 x 2,5 cm) a été réalisée sur une face du profil de chaque poutre et du panneau pour faciliter la mise en évidence des fissures et du délaminage des lamelles.

Une fois la charge appliquée à la rupture connue, la contrainte de rupture en flexion statique ( $\sigma_{FH}$ ) des poutres à l'humidité H, exprimée en mégapascal (MPa) est calculée selon la formule suivante (NBN EN 408+A1) :

$$\sigma_{FH} = \frac{3Pa}{bh^2}$$

Où,

$P$  est la charge totale appliquée à la rupture en flexion, en newtons (N) ;

$a$  est la distance, en millimètres (mm), entre un point de chargement et l'appui le plus proche;

$b$  est la largeur, en millimètres (mm), de la poutre ;

$h$  est la hauteur, en millimètres (mm), de la poutre.

Le module d'élasticité ( $E$ ) des poutres à l'humidité H, exprimé en mégapascal (MPa) est calculé selon la formule suivante :

$$E = \frac{3PaL^2}{4fbh^3}$$

Où,

$P$  est la charge totale appliquée à la rupture en flexion, en newtons (N) ;

$a$  est la distance, en millimètres (mm), entre un point de chargement et l'appui le plus proche;

$L$  est la distance, en millimètres (mm), entre les deux points de chargement ;

$b$  est la largeur, en millimètres (mm), de la poutre ;

$h$  est la hauteur, en millimètres (mm), de la poutre ;

$f$  est la différence entre la flèche maximale à mi-portée et la moyenne des flèches des deux capteurs placés au niveau des deux points de chargement, en millimètres (mm), de la poutre.

Concernant le panneau CLT (essai de flexion simple à 3 points), la contrainte de rupture en flexion statique ( $\sigma_{FH}$ ) à l'humidité H, exprimée en mégapascal (MPa) est calculée selon la formule suivante (NBN 225) :

$$\sigma_{FH} = \frac{3PL}{2bh^2}$$

Où,

$P$  est la charge totale appliquée à la rupture en flexion, en newtons (N) ;

$L$  est la distance, en millimètres (mm), entre les deux appuis (portée) ;

$b$  est la largeur, en millimètres (mm), du panneau ;

$h$  est la hauteur/épaisseur, en millimètres (mm), du panneau.

La rigidité ( $EI$ ) du panneau à l'humidité H, exprimée en mégapascal (MPa) est calculée selon la formule suivante :

$$EI = \frac{PL^3}{48f_m}$$

Où,

$P$  est la charge totale appliquée à la rupture en flexion, en newtons (N) ;

$L$  est la distance, en millimètres (mm), entre les deux appuis;

$f_m$  est la flèche maximale, en millimètres (mm), du panneau.

## 4. Résultats et discussion

### 4.1 Résultats et discussion de l'analyse des conteneurs de bois A et B issu des recyparcs d'Intradel

Les figures 15 et 16 montrent les résultats de l'analyse des 3 conteneurs de bois A et B d'Intradel sur le site de Biocentre à Grâce-Hollogne. Les 3 conteneurs (1, 2, 3) sont issus de communes différentes permettant ainsi un échantillonnage plus étendu. Le conteneur 1 est issu de Burdinne, le 2 de Saint Georges et le 3 de Flémalle 2. Un tableau plus détaillé est disponible en annexes (Annexe 6).

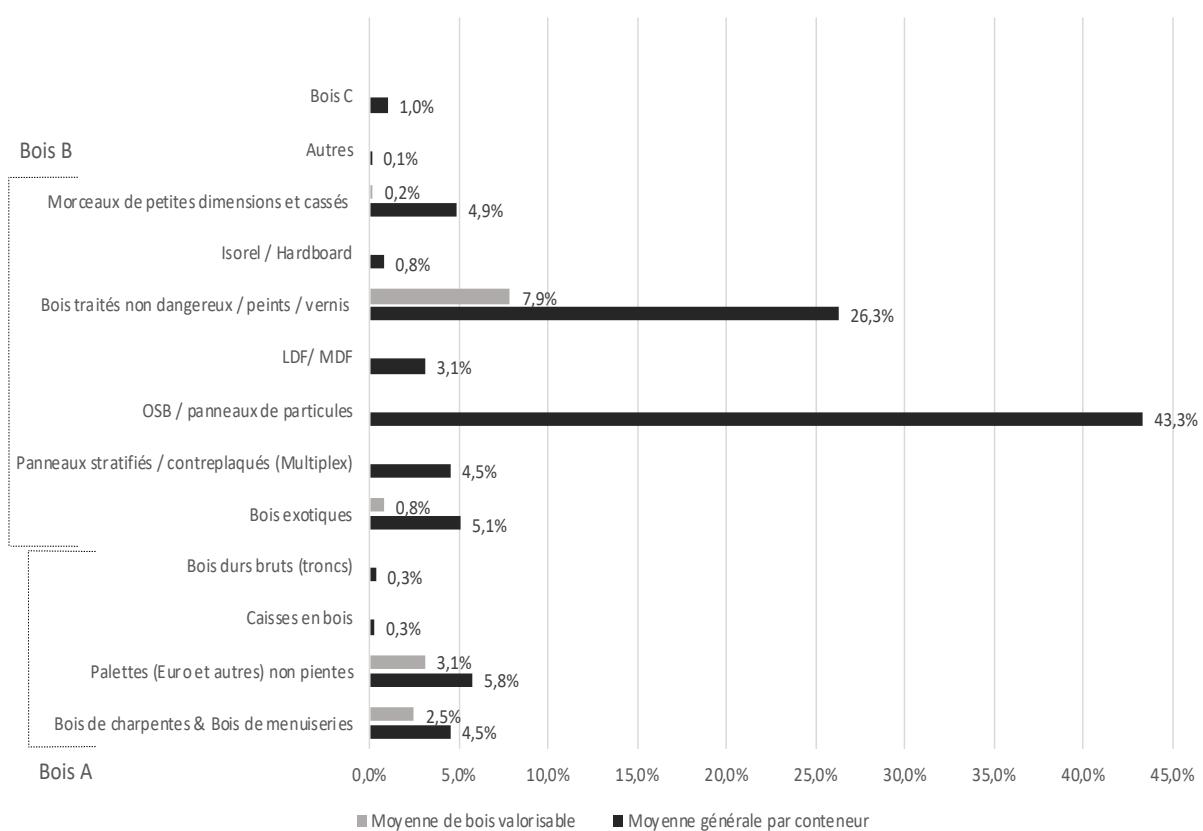


Figure 15. Pourcentage des types de produits en bois ainsi que leur partie valorisable par rapport au poids moyen (kg) du contenu des 3 conteneurs

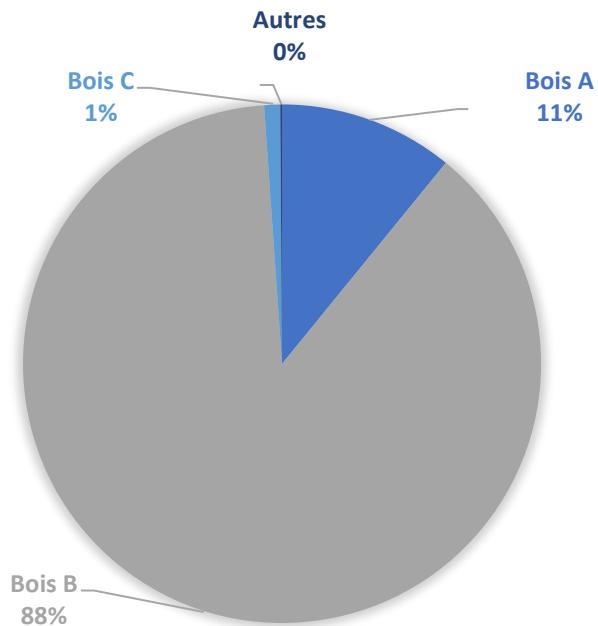


Figure 16. Pourcentage de bois A, B, C dans les 3 conteneurs analysés

Comme mentionné au point 3.2, chaque conteneur a été analysé indépendamment. Le pourcentage de chaque classe et des types de produits en bois ont tout d'abord été déterminés par conteneur et ensuite calculés pour l'ensemble. Une ventilation assez marquée ressort de cette analyse : 10,9 % de bois A, 88,0 % de bois B, 1 % de bois C et 0,1 % de composantes non ligneux (plastiques, verres, ...).

Pour le bois A, la proportion de palettes est assez constante (4,3 % à 6,6 %) avec une moyenne de 5,8 %. Concernant le bois B et plus spécifiquement, les types de panneaux en bois rencontrés dans l'ensemble des conteneurs analysés, il ressort que les panneaux de particules ou OSB sont largement dominants, suivi des panneaux stratifiés/contreplaqués et finalement des panneaux de fibres (LDF/MDF/HDF). Par ailleurs, les panneaux OSB ou de particules sont le type de produit le plus massivement rencontré dans les conteneurs analysés avec une moyenne de 43,3 % du contenu. Enfin, soulignons la très faible proportion de bois C (1 %) et autres composants (0,1 %) tels que le plastique et le verre présents dans les 3 conteneurs analysés.

Une étude menée par Guinard et al. sur un gisement de déchets non dangereux en 2012 en France a proposé une ventilation par classe de déchets (A, B, C) : 0,9 million de tonnes de déchets de bois A, 5,3 millions de tonnes de déchets de bois B, 0,6 million de tonnes de déchets de bois C et 1 million de tonnes de déchets autoconsommés pour lesquels aucune classification n'a pu être établie. Le bois B est donc majoritaire dans ce gisement (68 %), suivi de la part non classifiée (autoconsommée) (13 %), le bois A (12 %) et finalement 8 % pour le bois C.

Une seconde étude menée par Cousin et al. (2017), s'est penchée sur les déchets de bois des plateformes de regroupement-tri-broyage de déchets bois. Dans cette étude, la répartition de bois A est de 41 % et 59 % de bois B. Plus particulièrement,

cette étude s'est intéressée aux grands types de bois rencontrés avec 41 % de bois massif non traité, 27 % de bois massif traité en surface (peints, vernis, etc.), 21 % d'OSB ou panneaux de particules, 8 % de panneaux contreplaqués ou lattés et 3 % de panneaux de fibres.

Les résultats de ces deux études ainsi que ceux de notre travail sont à prendre avec précaution. En effet, les différences pourraient être dues aux différents types de centres de gestion des déchets de bois rencontrés, à la faible représentativité de la caractérisation présentée dans ce travail (3 conteneurs) et dans l'étude de Cousin et al. (une plateforme). Il faut ajouter à ces réserves les incertitudes mentionnées par Guinard et al. sur la ventilation proposée. De surcroit, la nature et les quantités des déchets de bois peuvent fortement varier en fonction de l'origine géographique, des moments de l'année, des saisons et des catastrophes naturelles (inondations, tempêtes).

Cependant, en croisant les résultats des différentes études, le bois B est largement majoritaire avec une part importante représentée par les panneaux de particules ou panneaux OSB. Quant au bois A, les proportions sont moindres. Ceci peut être facilement expliqué par le fait qu'il est en grande partie valorisé/autoconsommé par les particuliers et les entreprises, par exemple, dans le cas des particuliers en bois de chauffage.

Dans notre recherche, la proportion de bois valorisable pour la fabrication de bois lamellé-collé et de bois à plis croisés a également été estimée. Celle-ci s'élève à 14,5 % par conteneur. Cette estimation s'est basée sur les dimensions des éléments présents pour chaque type de produit (minimum 10 x 50 x 400 mm) et l'état de ceux-ci (traitements, pourriture, forme). Comme elle a été effectuée visuellement, il faut donc prendre cette information avec certaines réserves.

Plus spécifiquement, par classe, il en ressort que 5,6 % sur 10,9 % de bois A et 8,9 % sur 88,0% de bois B sont valorisables. Par type de produit, 55,5 % des bois de charpentes et de menuiseries non traités, 53,3 % des palettes, 30 % des bois traités non dangereux, 16,7 % des bois exotiques, et 5 % des morceaux de bois de petites dimensions ou cassés sont valorisables.

Selon l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME) en France, les déchets en bois collectés par les services publics en 2012 (collectes de types porte à porte, apports volontaires ainsi que les déchèteries et les bennes bois dédiées) représentent près 1,911 millions de tonnes, dont 72 % sont valorisés. Parmi ceux-ci, 48 % subissent un recyclage de la matière (opposé de la valorisation énergétique). Ces résultats peuvent donc être confrontés avec ceux de cette étude vu la similarité du système de gestion des déchets en question avec Intradel. Par conséquent, dans notre cas, les 14,5 % valorisables semblent cohérents avec les possibilités de valorisation pour la réalisation de poutres en BLC et de panneaux CLT, malgré les dimensions minimums exigées.

## 4.2 Résultats et discussion de la photo-interprétation des images des conteneurs prises par drone

Les figures 17 et 18 montrent les résultats de la photo-interprétation des images du contenu des 3 conteneurs prises par un drone DJI Air 2S. Un tableau plus détaillé est disponible en annexes (Annexe 7). Pour rappel, la photo-interprétation des images a été effectuée sur QGIS 3.10 grâce à l'extension Pintmap 2.0. Les fréquences relatives des grands types de bois et des classes (A,B,C) ont ainsi pu être calculées par conteneur puis extrapolées pour l'ensemble.

Les résultats qui se dégagent de cette photo-interprétation pour l'ensemble des conteneurs sont 10,3 % de bois A, 78,8 % de bois B, 0,2 % de bois C, 0,2 % d'autres composants et 10,6 % d'éléments indéterminés. Lorsqu'un point de la grille tombait sur un élément impossible à identifier avec certitude, il fut enregistré dans cette dernière classe.

Les proportions des types de produits en bois ont également pu être calculées et il en ressort que les panneaux de particules ou OSB sont majoritaires (34,1 %), suivis des bois traités non dangereux (peints, vernis) (32,7 %) et des palettes (6,5 %).

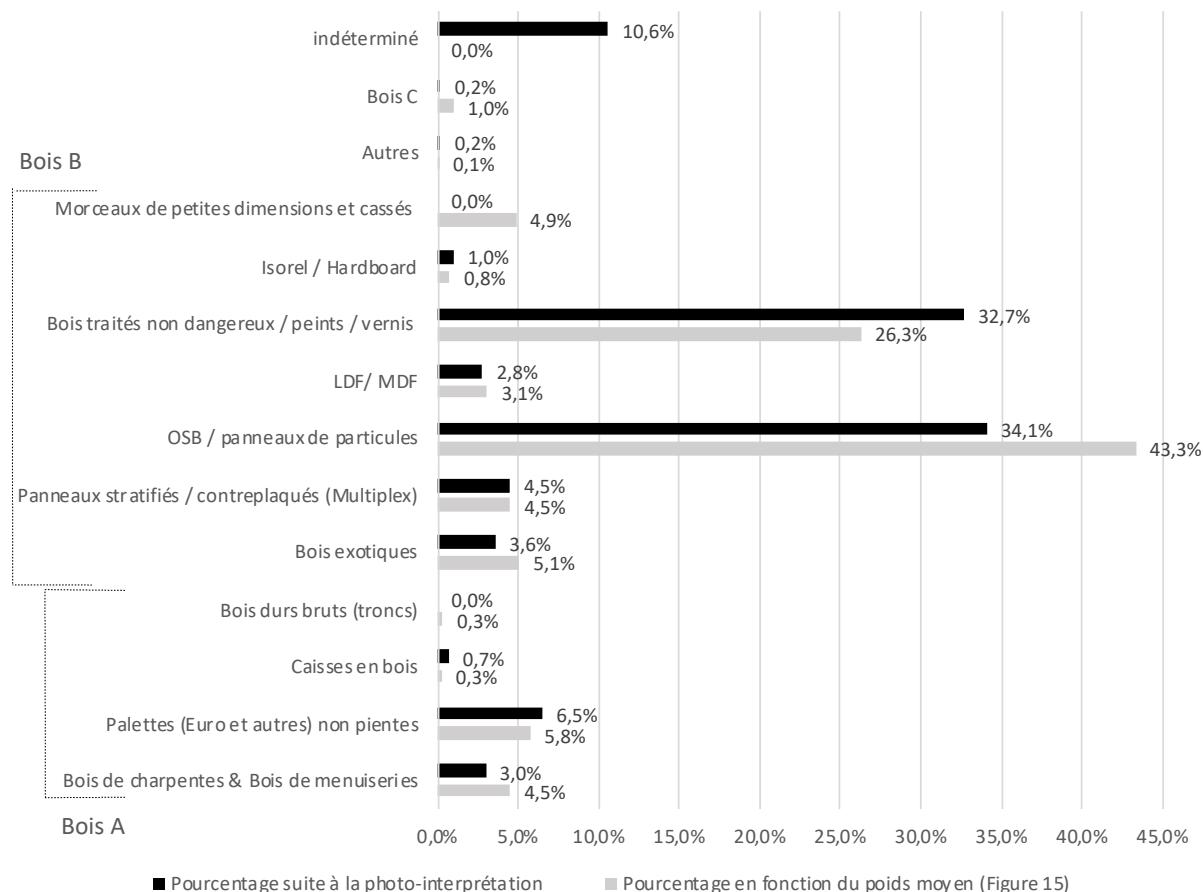


Figure 17. Pourcentage des types de produits en bois suite à la photo-interprétation et comparaison avec le pourcentage en fonction du poids moyen.

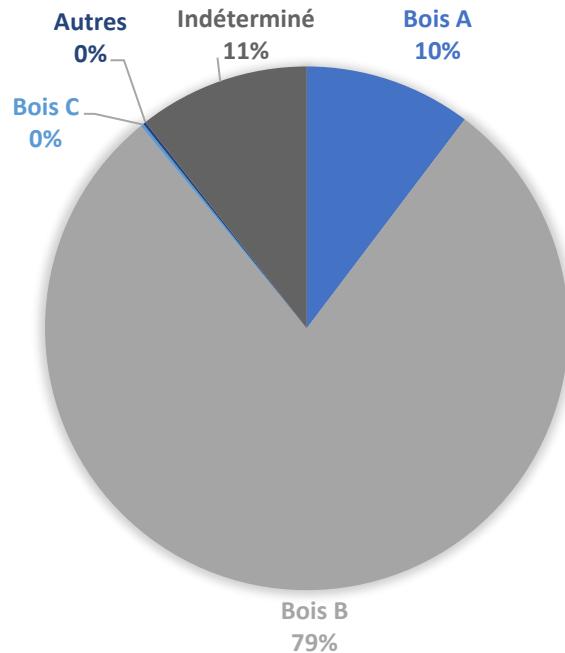


Figure 18. Pourcentage des catégories de bois suite à la photo-interprétation des images des conteneurs d'Intradel prises par drone

En croisant les résultats de la photo-interprétation avec ceux du point précédent (4.1) (Figure 17), il s'avère qu'une grande similitude en découle. De fait, 10,3 % de bois A contre 10,9 % lors des pesées et 78,8 % de bois B contre 88,0 % lors des pesées. De plus, l'ordre des types de produits en bois est également équivalent à celui estimé précédemment par pesée avec une dominance des panneaux de particules ou OSB, suivi des bois traités non dangereux et des palettes.

Les données qui découlent de la photo-interprétation doivent toutefois être pris avec précaution même si dans notre cas elles reflètent assez bien la réalité des faits. Cependant, étant l'opérateur qui a préalablement trié les différentes pièces de bois chez Intradel sur le site de Grâce-Hollogne, certains éléments tels que les morceaux de bois exotiques ont pu être déterminés sur l'image générée par drone. Sans cette première approche de terrain les résultats auraient donc légèrement changé même si les proportions n'auraient significativement pas été modifiées.

Aucune étude de ce type n'a été effectuée auparavant. En conséquence, les résultats n'ont pas pu être confrontés à d'autres données. Néanmoins, Verheyen et al. (2016) ont menés une étude et mis au point un système de triage par vision artificielle des déchets de bois (copaux). Cette installation permet de trier et distinguer les déchets de bois purs (bois A), des bois B. Ceci montre donc tout l'intérêt d'utiliser du matériel de vision dans le recyclage du bois pour le valoriser au maximum et plus efficacement ainsi que limiter le tri manuel qui est souvent fort fastidieux.

### 4.3 Résultats et discussion des essais de flexion simple des poutres BLC et du panneau CLT

La figure 19 montre les courbes charge - déflexion des essais de flexion simple des 4 poutres BLC. Les graphiques (charge – déflexion) de chaque poutre en fonction des 3 capteurs sont disponibles en annexes (annexes 8, 9, 10 et 11). Premièrement, seul les données du capteur 2, placé à mi-portée des poutres sont discutées. Pour la poutre 1, nous observons une défaillance complète à plus 9,3 mm de déflexion et à une charge de 19,39 KN due en premier lieu à une fracture du pli extérieur inférieur suivie presque instantanément d'un délamינage des lamelles internes au niveau des joints de colle. Concernant la poutre 2, une défaillance complète s'est produite à plus de 15,7 mm de déflexion et à une charge de 38,64 KN pour les mêmes raisons que la poutre 1. Pour la poutre 3, une chute significative est observée à environ 18,4 mm de déflexion suivi d'une défaillance complète à plus de 23,4 mm de déflexion et à une charge de 42,42 KN. Ceci est dû au fait, que dans un premier temps, le pli extérieur inférieur de la poutre 3 a subi une fracture suivie presque immédiatement du délamינage des lamelles internes au niveau des joints de colle, puis environ 1,5 secondes après, le pli supérieur s'est également fissuré. Quant à la poutre 4, une défaillance complète a eu lieu à plus de 13,7 mm de déflexion et à une charge de 26,95 KN pour les mêmes raisons que les poutres 1 et 2.

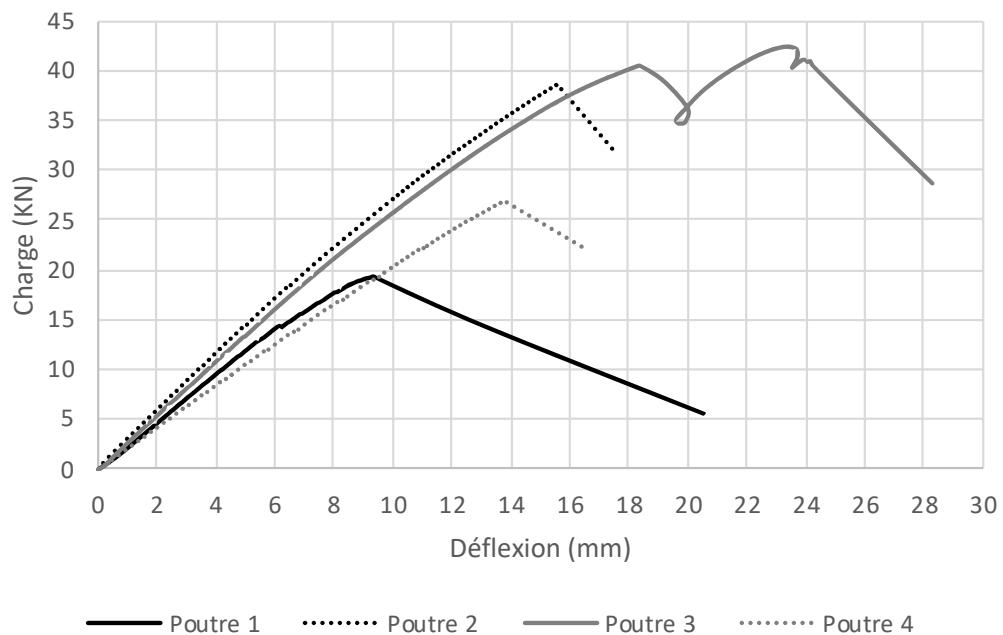


Figure 19. Courbes charge – déflexion des essais de flexion simple des poutres BLC

L'état des spécimens au niveau de la rupture après les essais de flexion est illustré aux figures 20 et 21. En analysant les vidéos des essais de flexion des 4 poutres BLC, il en découle que pour chaque poutre la partie supérieure est en compression et la partie inférieure en traction. La première fissure se situe au niveau du pli extérieur inférieur suivi du délamינage des lamelles internes au niveau des joints de colle. En dernier lieu, une cassure apparaît également au niveau du pli extérieur supérieur de la poutre. Ces différentes étapes ont eu lieu à des charges maximales différentes pour les 4 poutres.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figure 20. Fractures et délamination à la charge maximale : (a) poutre 1 (19393 N) ; (b) poutre 2 (38643 N) ; (c) poutre 3 (42416 N) et (d) poutre 4 (26945 N)



Figure 21. État des poutres BLC après les essais de flexion simple

Hormis les défauts naturels du bois tels que les nœuds, les zones les plus faibles des poutres sont incontestablement les joints de colle au niveau des lamelles internes. Une alternative proposée est la disposition en brique (chevauchement) et/ou un assemblage par aboutage par entures multiples. Ces méthodes sont plus laborieuses et le matériel pour les réaliser indisponible à Gembloux.

La figure 22 montre les courbes charge - déflexion de l'essai en flexion du panneau CLT. Deux charges ont été effectuées car lors de la première charge, la tête de chargement choisie était trop étroite et a marqué trop fortement le panneau. De plus, le capteur 5 (central) est placé sur la tête de chargement, ces données sont donc fortement faussées. Le processus a été arrêté avant la rupture et ces données ne sont pas reprises. Une deuxième charge a donc eu lieu jusqu'à la rupture avec une tête de chargement présentant une aire supérieure pour limiter l'impact de celle-ci sur le panneau. Lors de la deuxième charge, les données du capteur 5 ont subi un biais de l'ordre de 5 %.

En se basant sur la deuxième charge et le capteur 5, placé à mi-portée, une première chute a eu lieu à environ 17,7 mm de déflexion et à une charge de 186 kN suivi d'une défaillance complète à plus de 19,2 mm de déflexion. La charge maximale a atteint 188 480 N.

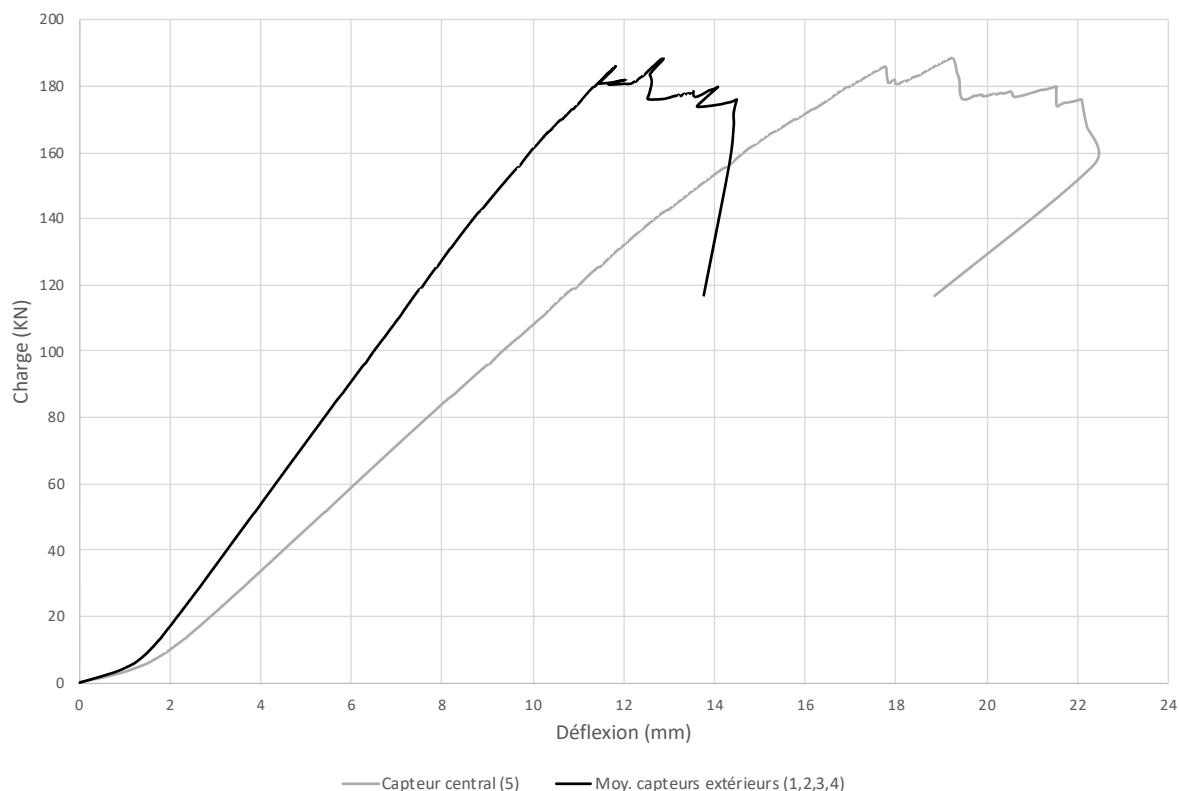


Figure 22. Courbes charge – déflexion de l'essai de flexion simple du panneau CLT

L'état du panneau CLT au niveau de la rupture après l'essai de flexion est illustré à la figure 23. Suite à l'analyse de la vidéo de l'essai de flexion, il en ressort que la partie supérieure est évidemment en compression et la partie inférieure en traction. Une première cassure de tension s'est produite au niveau du pli extérieur inférieur suivi de différentes fissures et d'un délamination des lamelles internes au niveau des joints de colle. De plus, en raison de sa structure orthogonale, le panneau CLT a également présenté une rupture typique par cisaillement roulant (Figure 23b). Le chargement a été arrêté avant la rupture du pli extérieur supérieur.

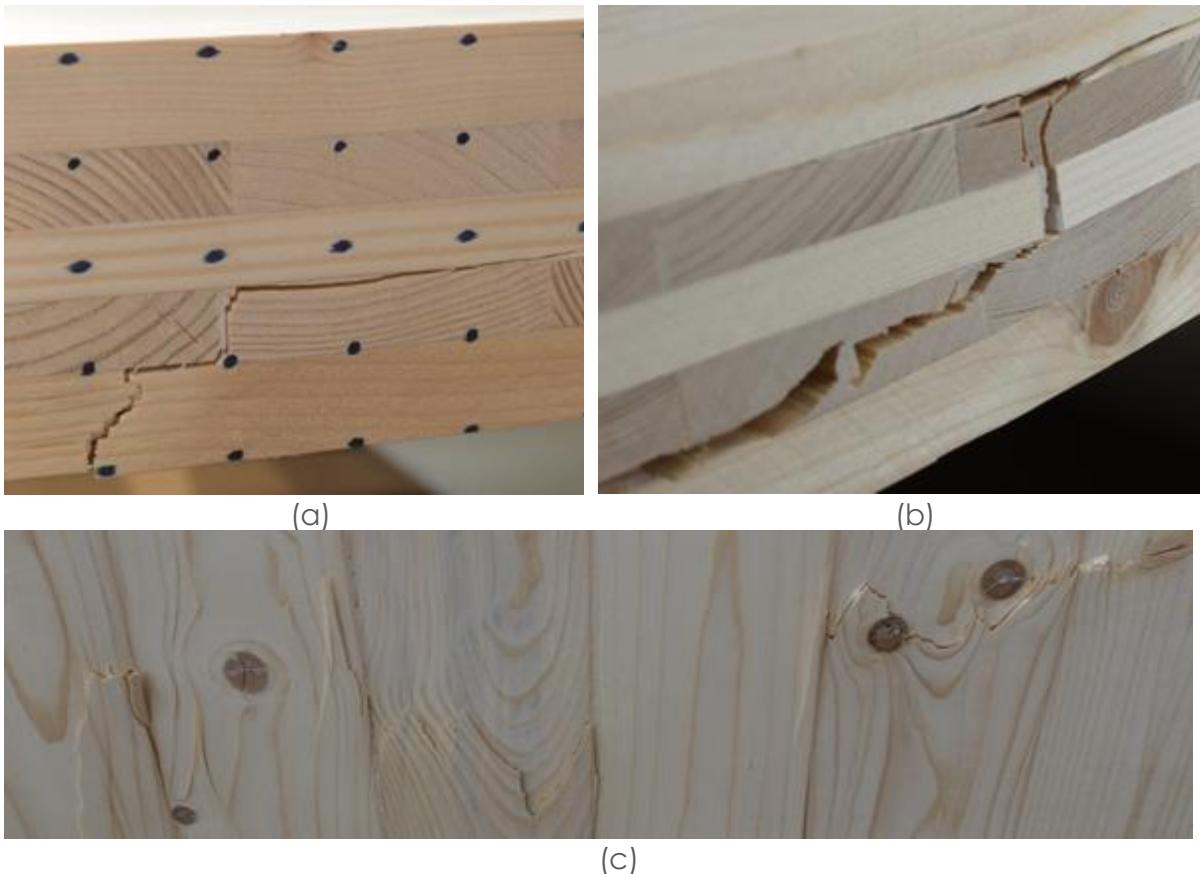


Figure 23. Fractures et délamination à la charge maximale du panneau CLT : (a-b) profil des deux côtés de 100 cm ; (c) face inférieure au niveau du point de chargement

Tout comme pour les poutres BLC, les zones les plus sensibles du panneau CLT sont indéniablement les joints de colle des lamelles internes. Un assemblage par aboutage par entures multiples aurait également pu améliorer la résistance du panneau.

La table 2 présente un résumé des résultats des essais de flexion simple pour les 4 poutres BLC et le panneaux CLT. En utilisant les équations vues au point 3.4 (p29-30), les valeurs du module de rupture en flexion statique (MOR) sont respectivement de 25,97 et 51,75 MPa pour les poutres de 7 cm de large, de 66,28 et 42,1 MPa pour les poutres de 6 cm de large et de 36,43 MPa pour le panneau CLT. Les valeurs du module d'élasticité ( $E$ ) sont de 10209,2 MPa et 13112,0 MPa pour les poutres de 7 cm de large et de 9988,5 MPa et 9717,2 MPa pour les poutres de 6 cm de large. La rigidité du panneau CLT ( $EI$ ) est de  $1,489 \times 10^{11}$  Nmm $^2$ .

Table 2. Résultats des essais de flexion simple des poutres BLC et du panneau CLT

Spécimen	Dimensions				$\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )	L <sub>portée</sub> (mm)	Humidité (%)	P <sub>max</sub> (N)	MOR (MPa)	E (Mpa)	EI (Nm <sup>2</sup> )
	L (mm)	b (mm)	h (mm)	w (kg)							
Poutre 1	1500	70	120	6,5	515,9	1360	10,7	19393	25,97	10209,2	/
Poutre 2	1500	70	120	6,3	500,0	1360	10,5	38643	51,75	13112,0	/
Poutre 3	1500	60	120	4,9	453,7	1360	10,7	42416	66,28	9988,5	/
Poutre 4	1500	60	120	5,1	472,2	1360	10,9	26945	42,10	9717,2	/
Panneau CLT	1000	990	84	38,4	461,8	900	10,6	188480	36,43	/	1,49E+11

L = longueur ; b = largeur ; h = hauteur ; w = poids ;  $\rho$  = masse volumique

Le module d'élasticité (E ou MOE) des poutres de 7 cm est plus élevé que celles de 6 cm, elles sont par conséquent plus rigides. Les poutres de 7 cm auraient normalement dû résister à une charge maximale plus importante que celles de 6 cm. Toutefois, la présence d'un nœud conséquent sur le pli extérieur inférieur de la poutre 1 (figure 20a), centré sous le joint de colle des lamelles internes a indéniablement induit une amorce de rupture et joué en défaveur de la résistance en flexion de la poutre. L'influence des noeuds au niveau de l'axe neutre est négligeable, même sur le comportement en cisaillement. Sur la partie de la poutre soumise en traction, leur influence est significativement supérieure à la partie comprimée (Bustos, 2003). De plus, la présence de noeuds à proximité des joints diminue la résistance en flexion (Bertino et Marchaison, 2011). En outre, une légère différence de pression lors du pressage et/ou de quantité d'adhésif lors de l'assemblage des poutres et du panneau peut influencer la résistance. Dans notre étude, il aurait donc fallu un plus grand nombre de poutres des deux dimensions pour démontrer une différence significative de résistance.

En comparant les résultats obtenus avec la norme NBN EN 14080 (table 3), toutes les poutres réalisées sont au moins équivalentes à la classe GL 20h. En effet, malgré des résistances en flexion élevées, les valeurs du module d'élasticité des poutres 1, 3 et 4 ne permettent pas de passer dans une classe supérieure. Pour la poutre 2, la résistance en flexion, le module d'élasticité et la masse volumique sont suffisamment élevés pour correspondre à une classe GL 28h. Le panneau CLT a également une résistance en flexion assez élevée (36 MPa) mais en l'absence de son module d'élasticité nous ne pouvons pas le comparer avec une des classes de la norme NBN EN 16351.

Table 3. Classes de résistance du bois lamellé-collé – source : NBN EN 14080

Classes de résistance du bois lamellé-collé	GL 20h	GL 22h	GL 24h	GL 26h	GL 28h	GL 30h	GL 32h
Résistance en flexion (Mpa)	20	22	24	26	28	30	32
Module d'élasticité (Mpa)	8 400	10 500	11 500	12 100	12 600	13 600	14 200
Masse volumique (Kg/m <sup>3</sup> )	370	410	420	445	460	480	490

Une étude menée par Frese et Blab (2006) pour déterminer la résistance à la flexion du bois lamellé-collé de hêtre montre une résistance moyenne en flexion de plus de 44,5 MPa et un module d'élasticité moyen de plus de 14000 MPa.

Une seconde étude a été effectuée par Parra-Serrano et al. en 2018 sur l'utilisation du bois d'hévéa brasiliensis pour la production de poutres en lamellé-collé. Des poutres (5,5 x 11 x 200 cm) ont été soumises à des essais de flexion simple. Les résultats

montrent une résistance moyenne en flexion à la rupture de 49,3 MPa et un module d'élasticité moyen de 9766,4 MPa. De plus, ils ont démontré que la résistance à la flexion des poutres BLC dépend fortement de la résistance à la traction de l'aboutage, ce qui s'est avéré être le point critique dans notre étude.

Pour ce qui est du CLT, une étude a été réalisée par Rose et al. (2018) sur la valorisation de déchets bois issu du secteur de la construction et de la démolition comme matière première pour le bois lamellé croisé. Dans cette recherche, ils ont également examiné et comparé la résistance en compression et flexion de bois CLT à base de déchets de bois (Cross Laminated Secondary Timber : CLST) et de bois CLT réalisé à base de pin scandinave neuf et séché (Cross Laminated Primary Timber : CLPT). Il apparaît que les propriétés des deux matériaux étaient similaires en compression mais que la résistance en flexion du CLST n'était qu'à 60 % de celle du CLPT. La résistance en flexion du CLST variait de 15 à 20 MPa et celle du CLPT de 25 à 30 MPa, tandis que le MOE en flexion du CLST (8500 à 11400 MPa) était environ le double de celui du CLPT (4000 à 6000 MPa). Le faible MOR et le MOE élevé ont été attribués au grand nombre de joints. Cependant, une plus grande fragilité et rigidité peuvent également être un effet du vieillissement.

En 2022, Li et al., se sont notamment penchés sur les performances en flexion de poutres en CLT et BLC. Deux poutres CLT et BLC de 105 x 300 x 2940 mm ont été découpées dans un panneau CLT et BLC et des essais de flexion à 4 points ont été effectués. Il apparaît que pour les poutres en CLT la moyenne de la résistance en flexion est de 32,7 MPa, le MOE moyen de 10992,5 MPa et la rigidité moyenne ( $EI$ ) de  $3,2 \times 10^{11}$  Nmm $^2$ . Concernant les poutres en BLC, la moyenne de la résistance en flexion est de 41,8 MPa, le MOE moyen de 11792,3 MPa et la rigidité moyenne ( $EI$ ) de  $3,4 \times 10^{11}$  Nmm $^2$ .

De nombreuses autres recherches se sont également intéressées au CLT. Ainsi O'Ceallaigh et al. (2018) ont effectué des essais sur des panneaux CLT composés de 5 plis de 20 mm d'épaisseur avec une épaisseur total de 100 mm, une largeur 584 mm et une portée de 2400 mm. Les résultats montrent une résistance moyenne de 34 MPa, un MOE moyen de 6310,2 MPa et une rigidité moyenne ( $EI$ ) de  $3,41 \times 10^{11}$  Nmm $^2$ . Une autre recherche de Buck et al. (2016) s'est penchée sur les propriétés en flexion de CLT. Dix poutres de 95 x 590 x 2000 mm avec une portée de 1710 mm ont une résistance en flexion moyenne de 35,2 MPa, un MOE moyen de 8243,0 MPa et une rigidité moyenne ( $EI$ ) de  $3,48 \times 10^{11}$  Nmm $^2$ .

Concernant les résultats de notre étude sur les poutres BLC et le panneau CLT, il s'avère que la moyenne de la résistance en flexion des poutres BLC est de 46,5 MPa et celle du panneau de 36,4 MPa. Le MOE moyen est quant à lui de 10756,7 MPa pour les poutres BLC. En comparant nos résultats avec ceux des études mentionnées précédemment, il en résulte que, malgré l'utilisation de déchets de bois (bois A et B) et la simplicité d'assemblage, les résistances en flexion de nos produits sont semblables voir même supérieures. Néanmoins, les MOE de nos poutres BLC sont légèrement inférieurs à celles des autres études et la rigidité ( $EI$ ) de notre panneau CLT est fortement inférieure. Ceci dépend essentiellement de sa faible portée.

Ces résultats montrent donc tout le potentiel qu'a le recyclage du bois pour le secteur de la construction. Cependant, nos résultats doivent être pris avec une certaine réserve du fait de la faible représentativité de cette étude.

## 5. Recommandations et perspectives

En tant que recherche pilote, certaines étapes de fabrication pourraient être améliorées pour influencer positivement les résultats de l'étude :

- Par un arrangement en brique (chevauchement) des lamelles
- Grâce à un aboutage par entures multiples des lamelles
- En déterminant la pression, la quantité et le type de colle optimal pour obtenir une résistance maximale.

De surcroit, pour faire progresser ce concept vers une application commerciale, les résultats stimulent d'autres questions de recherches :

- Quelles quantités de bois A et B sont disponibles et utilisables pour la réalisation de produits BLC et CLT à l'échelle nationale et européenne ?
- Quelles quantités de bois A et B sont disponibles et utilisables pour la réalisation de produits BLC et CLT dans le secteur de la construction et de la démolition ?
- Quel est le coût d'un tel processus par rapport au BLC/CLT conventionnel ?
- Comment la variabilité des déchets de bois A et B influence-t-elle les propriétés du CLT et BLC ?

Enfin, la réalisation d'essais supplémentaires de traction, de compression, de cisaillement et de flexion sur une plus grande quantité d'échantillons est nécessaire pour améliorer la robustesse des résultats.

## 6. Contribution personnelle

Afin de cerner le sujet de cette étude, l'étudiant a réalisé de nombreuses recherches dans la littérature. Ces recherches ont permis de planifier et structurer les différentes étapes de ce travail.

L'étudiant a pris contact avec Intradel pour pouvoir analyser des conteneurs et avoir accès à leurs données. Il a entrepris l'analyse et la supervision d'une équipe.

L'étudiant a également récupéré des échantillons de bois et a réalisé les différentes étapes de fabrication des produits BLC et CLT (section 3.2) avec l'aide de Lachen HADIY au Laboratoire de Technologie du Bois à Gembloux. Il a également pris contact avec la société Soudal pour avoir un don gracieux d'échantillons de colle.

Une fois les poutres et le panneau finis, les essais ont été réalisés à l'université de Mons grâce au personnel du département de mécanique des structures avec l'aide de l'étudiant.

Les données récoltées ont été interprétées, synthétisées et comparées avec les résultats d'autres études par l'étudiant pour en tirer une conclusion.

## 7. Conclusion

Nous pouvons conclure que les déchets de bois A et B possèdent un potentiel de valorisation en construction. L'analyse des déchets de bois présents dans les conteneurs des recyparcs d'Intradel ainsi que les poutres en bois lamellé-collé et le panneau en bois lamellé croisé qui ont été confectionnées et testés par la suite le démontre. De plus, ces dernières années, les produits BLC et CLT offrent à l'ingénierie du bois mais également à tout le secteur de la construction de nouvelles possibilités et perspectives. Par ailleurs, dans le contexte actuel de décarbonation de l'économie, ils rentrent d'autant plus en concurrence avec les matériaux de construction minéraux tels que le béton et l'acier.

L'analyse des conteneurs a permis de montrer les proportions des différentes catégories de bois rencontrées. Une ventilation assez marquée ressort de cette analyse : 10,9 % de bois A, 88,0 % de bois B, 1 % de bois C et 0,1 % de composants non ligneux (plastiques, verres, ...). La proportion de bois valorisable pour la fabrication BLC et CLT a également été estimée à 14,5 % par conteneur. Quant aux résultats de la photo-interprétation du contenu des conteneurs, ceux-ci sont semblables à la première analyse et semblent donc être prometteur.

Grâce à des essais de flexion simple à 4 points pour les poutres et à 3 points pour le panneau, leur résistance en flexion a pu être calculée. La résistance moyenne des poutres est de 46,5 MPa et celle du panneau est de 36,4 MPa. Le module d'élasticité moyen des poutres BLC est de 10756,7 MPa et la rigidité ( $EI$ ) du panneau est de  $1,489 \times 10^{11}$  Nmm<sup>2</sup>. En outre, les résultats montrent des similitudes avec de précédentes études protées sur des produits BLC et CLT à base de bois neufs. Ils nous rassurent donc quant à la faisabilité de ces produits à base de bois recyclés et nous encouragent à approfondir cette recherche vers un protocole de fabrication et d'essais plus élaborés en vue d'une utilisation industrielle.

## 8. Bibliographie

Alexandre S., 2014. Le bois, un matériau rare ? Vers une hiérarchie des usages du bois. Rev. For. Fr. (3), Fr.], ISSN 0035, DOI:10.4267/2042/56062.

Bamber, R. K., and Burley J., 1983. The wood properties of radiata pine. Commonwealth Agricultural Bureaux, Slough, UK., 84 pp.

BCM environnement, 2021. Définition et recyclage des classes de déchets de bois. <https://www.bcm-environnement.fr/classe-bois>, (8/12/2021).

Bernito et Marchaison, 2011. Caractérisation des pièces aboutées pour le domaine de la construction 56.

Bois – Paprec, 2020. <https://www.paprec.com/fr/comprendre-le-recyclage/tout-savoir-sur-les-matieres-recyclables/bois/> (9/12/2021).

Bois | Je Trie Dans Mon Entreprise, 2021. <https://jetriedansmonentreprise.be/comment-bien-trier/bois/>, (8/12/2021).

Bradner R., Flatscher G., Ringhofer A., Schickhofer G. and Thiel A., 2016. Cross Laminated Timber (CLT): overview and development. European Journal of Wood and Wood Products, Vol. 74, No. 3, pp. 331-351.

Buck D., Wang X. (Alice), Hagman O. & Gustafsson A., 2016. Bending Properties of Cross Laminated Timber (CLT) with a 45° Alternating Layer Configuration. BioResources 11(2), 4633–4644, DOI:10.15376/biores.11.2.4633-4644.

Burnard DM., Tavzes Č., Tošić A., Brodnik A., Kutnar A., 2015. The role of reverse logistics in recycling of wood products. In: Muthu SS (ed) Environmental implications of recycling and recycled products, Environmental footprints and eco-design of products and processes, Springer, Singapore

Cave, I. D., 1968. The anisotropic elasticity of the plant cell wall. Wood Sci. Technol. 2(4):268–278.

Cave, I. D., 1969. The longitudinal Young's modulus of *Pinus radiata*. Wood Sci. Technol. 3(1):40–48.

Cave, I. D., and J. C. F. Walker., 1994. Stiffness of wood in fast-grown plantation softwoods: the influence of micro-fibril angle. Forest Prod. J. 44(5):43–48.

Churkina G., Organschi A., Reyer C.P.O., Ruff A., Vinke K., Liu Z., Reck B.K., Graedel T.E. & Schellnhuber H.J., 2020. Buildings as a global carbon sink. Nat Sustain 3(4), 269–276, DOI:10.1038/s41893-019-0462-4.

Cousin S., Fleury M., Boulday D., et al., 2017. Etat de l'art de la gestion des déchets de bois en Europe. Le Bois International – Les cahiers du bois-énergie

De Mil T., 2021. Cours de science du bois, Université de Liège.

DEMOWOOD, 2012. Optimisation of material recycling and energy recovery from waste and demolition wood in different value chains NWP2-ER-2009-235066, Deliverable for DL—

WP2.1. [http://www.wwnet-demowood.eu/fileadmin/PTS/Demowood/Dokumente/DL\\_WP2.1\\_Sorting%20Techniques\\_pts\\_120607.pdf](http://www.wwnet-demowood.eu/fileadmin/PTS/Demowood/Dokumente/DL_WP2.1_Sorting%20Techniques_pts_120607.pdf). (10/11/2021)

DEMOWOOD, 2013. Optimisation of material recycling and energy recovery from waste and demolition wood in different value chains NWP2-ER-2009-235066, Deliverable for DL—WP2.2. [http://www.wwnet-demowood.eu/fileadmin/PTS/Demowood/Dokumente/DL\\_WP2.2\\_Quality%20Assessment%20of%20Waste%20Wood.pdf](http://www.wwnet-demowood.eu/fileadmin/PTS/Demowood/Dokumente/DL_WP2.2_Quality%20Assessment%20of%20Waste%20Wood.pdf) (10/11/2021)

DEMOWOOD, 2015. Material recycling and energy recovery from waste and demolition wood. <http://www.wwnet-demowood.eu/index.php?id=1354>. (10/11/2021)

Dinwoodie JM., 2000. Timber: Its nature and behaviour, 2<sup>nd</sup> edn. EFN Spon, London, New York, p 257

Eurostat, 2022. Generation of waste by waste category, hazardousness and NACE Rev. 2 activity. <https://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/submitViewTableAction.do>. (01/05/2022)

Fischlin, A.: 1996, 'Conflicting objectives while 45orms45zati carbon sequestration by forests', in *Forest Ecosystems, Forest Management and the Global Carbon Cycle*, NATO ASI Series, Vol. I 40, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, pp. 163–172.

Flach M. & Frenette C.D., 2002. Le retour du bois. Tracés : bulletin technique de la Suisse romande 128(12), DOI :10.5169/SEALS-80288.

Fouquet D., 1991. Valorisation du matériau « bois et dérivés » dans la construction en Guyane. Bois & Forêts des Tropiques. **227**, 63–67, DOI : 10.19182/bft1991.227.a19718.

Frese M. & Blaß H.J., 2007. Characteristic bending strength of beech glulam. Mater Struct 40(1), 3–13, DOI:10.1617/s11527-006-9117-9.

Goverse T., Hekkert M.P., Groenewegen P., Worrell E. & Smits R.E.H.M., 2001. Wood innovation in the residential construction sector; opportunities and constraints. Resources, Conservation and Recycling **34**(1), 53–74, DOI :10.1016/S09213449(01)00093-3.

Green, D.W., Kretschmann, D. E., 1994. Moisture content and the properties of clear Southern Pine, Res. Pap. FPL-RP-531. Madison, WI:U.S. Department of agriculture, Forest Service, Products Laboratory.

Guinard D., 2009. La filière bois en Europe et dans le monde. Annales des Mines – Responsabilité et environnement, 53, 49-55. DOI: 10.3917/re.053.0049.

Gustafsson A., Crocetti R., Just A., Landel P., Olsson J., Pousette A., Silfverhielm M. & Östman B., 2019. The CLT Handbook, Föreningen Sveriges Skogsindustrier, 188.

Hasan AR., Schindler J., Solo-Gabriele H.M. & Townsend T.G., 2011. Online sorting of recovered wood waste by automated XRF-technology. Part I: Detection of preservative-treated wood waste. Waste Management 31(4), 688–694, DOI:10.1016/j.wasman.2010.11.010.

Höglmeier K., Weber-Blaschke G. & Richter K., 2013. Potentials for cascading of recovered wood from building deconstruction—A case study for south-east Germany. Resources, Conservation and Recycling **78**, 81–91, DOI :10.1016/j.resconrec.2013.07.004.

Hout Info Bois, 2012. Bois – guide pour le bon usage. Bruxelles.

Huybrechts L. et Engelborghs T., 2021. Uitbreiden van end-of-life toepassingen van constructiehout 90.

IBN, 1956. NBN 225 : Bois - Méthodes d'essai de qualification, Bruxelles.

IBN, 2002. NBN EN 13183-2 : Teneur en humidité d'une pièce de bois scié - Partie 2: Estimation par méthode électrique par résistance, Bruxelles.

IBN, 2012. NBN EN 408+A1 : Structures en bois - Bois de structure et bois lamellé-collé - Détermination de certaines propriétés physiques et mécaniques, Bruxelles.

IBN, 2013. NBN EN 14080 : Structures en bois - Bois lamellé collé et bois massif reconstitué – Exigences, Bruxelles.

IBN, 2016. NBN EN 204 : Classification des colles thermoplastiques pour bois à usages non structuraux, Bruxelles.

IBN, 2016. NBN EN 338 : Bois de structure - Classes de résistance, Bruxelles.

IBN, 2021. NBN EN 16351 : Structures en bois - Bois lamellé croisé – Exigences, Bruxelles.

Intradel, 2021. Recyparc Guide Pratique. 31. <https://www.intradel.be/actualites/conseils/nouveau-guide-pratique-des-recyparcs-disponible-en-ligne-et-dans-votre-recyparc.htm?lNg=fr>

IPCC: 1996, *Climate Change 1995; The Science of Climate Change*, Cambridge University Press, published for the International Panel on Climate Change (IPCC), Cambridge.

Issa C.A. & Kmeid Z., 2005. Advanced wood engineering: glulam beams. Construction and Building Materials 19(2), 99–106, DOI:10.1016/j.conbuildmat.2004.05.013.

Karacabeyli E. and Douglas B., 2013. CLT Handbook: Cross-laminated timber. U.S. edition, FPIInnovations, Pointe-Claire, Canada

Kutnar A. et Muthu S.S. (Eds.), 2016. *Environmental Impacts of Traditional and Innovative Forest-based Bioproducts*, Environmental Footprints and Eco-design of Products and Processes, Singapore: Springer Singapore.

Leek N., 2010. Post-consumer wood. Pp 93-96. In: Euwood – Final report. Hamburg/Germany, June 2010. 160 p.

Leloy C., 2011. Fabrication d'un matériau d'exception. In : Le eBook du Centenaire 100 ans de bois lamellé. 12.

Li H., Wang L., Wei Y., Wang B.J. & Jin H., 2022. Bending and shear performance of cross-laminated timber and glued-laminated timber beams: A comparative investigation. Journal of Building Engineering 45, 103477, DOI:10.1016/j.jobe.2021.103477.

Lindstrom H., Harris P., and Nakada R., 2002. Methods for measuring stiffness of young trees. Holz Roh-Werkst. 60(3):165 – 174.

Llana et al, 2020. Proceedings of the 2020 Society of Wood Science and Technology International Convention. In: *Renewable Resources for a Sustainable and Healthy Future – Proceedings of the 2020 Society of Wood Science and Technology International Convention*.

Presented at the Renewable Resources for a Sustainable and Healthy Future Society of Wood Science & Technology, 1–833.

MADSEN B., 1992. Structural behaviour of timber. Timber engineering Ltd. 405 p + ann.

Mantau U. et al., 2010. Euwood – Real potential for changes in growth and use of EU forests. Final report. Hamburg/Germany, June 2010. 160 p.

Matthews, R. W., Nabuurs, G.-J., Alexeyev, V., Birsey, R. A., Fischlin, A., Maclaren, J. P., Marland, G., and Price, D. T., 1996. 'WG3 Summary: Evaluation the role of forest management and forest products in the carbon cycle', in *Forest Ecosystems, Forest Management and the Global Carbon Cycle*, NATO ASI Series, Vol. I 40, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, pp. 293–301.

Munandar W.A., Purba R.H. & Christiyanto A., 2019. Exploratory study on the utilization of recycled wood as raw material for cross laminated timber. *IOP Conf. Ser. : Mater. Sci. Eng.* **669**(1), 012011, DOI :10.1088/1757-899X/669/1/012011.

Nahal A., 2011. Etude de la faisabilité d'un bois lamellé-collé à partir d'essence algérienne.

Navi, P., Heger, F., 2005. Comportement thermo-hydromécanique du bois, application techniques et dans structures, Presses polytechniques et universitaires romandes, CH-1015 Lausanne.

Niles, J. et Schwarze, R.: 2001, 'The value of careful carbon accounting in wood products', *Clim. Change* **49**(4), 371–376.

O'Ceallaigh C., Sikora K. & Harte A., 2018. The Influence of Panel Lay-Up on the Characteristic Bending and Rolling Shear Strength of CLT. *Buildings* **8**(9), 114, DOI:10.3390/buildings8090114.

Parlement européen et du Conseil, 2008. Directive 2008/98/CE du 19 novembre 2008 relative aux déchets et abrogeant certaines directives, Article 11.

Parra-Serrano L.J., Piva M.E.M., Cerchiari A.M.F., Lima I.L. de & Garcia J.N., 2018. Use of Hevea brasiliensis Rubberwood for Glulam Beam Production. *Floresta Ambient.* **25**(2), DOI:10.1590/2179-8087.038616.

Privat F., 2019. Faisabilité du recyclage en boucle fermée des déchets post consommateurs en bois massif 164.

Pugh T.A.M., Lindeskog M., Smith B., Poulter B., Arneth A., Haverd V. & Calle L., 2019. Role of forest regrowth in global carbon sink dynamics. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* **116**(10), 4382–4387, DOI :10.1073/pnas.1810512116.

Robert M. et Saugier B., 2003. Contribution des écosystèmes continentaux à la séquestration du carbone. *Comptes Rendus Geoscience* **335**(6–7), 577–595, DOI :10.1016/S1631-0713(03)00094-4.

Rondeaux J-F., 2021. Cours de science du bois : Construction et structures en bois, Université de Liège.

Rose C., Bergsagel D., Dufresne T., Unubreme E., Lyu T., Duffour P. & Stegemann J., 2018. Cross-Laminated Secondary Timber: Experimental Testing and Modelling the Effect of Defects and Reduced Feedstock Properties. *Sustainability* 10(11), 4118, DOI:10.3390/su10114118.

Rowell RM., 2002. Sustainable composites from natural resources. In: Brebbia CA, de Wilde WP (eds) *High performance structures and composites*. WIT Press Boston, MA, pp 183–192

Sirkin T. et Ten Houten M., 1994. The cascade chain: A theory and tool for achieving resource sustainability with applications for product design. *Resources, Conservation and Recycling*, **The Cascade Chain** 10(3), 213–276, DOI:10.1016/09213449(94)90016-7.

Skog N., 1998. Carbon cycling through wood products: the role of wood and paper products in carbon sequestration **48**(7), 9.

SNBL et Skogsindustrierna, 2007. Lamellé-collé – Un matériau de performance & d'architecture.

SPF economie, 2008. STS 04 Bois et panneaux à base de bois, Bruxelles.

Supartini, 2012. Characteristics of cross laminated timber made from fast growing timber with different number of layers. Thesis, Graduate school, Institut Pertanian Bogor (IPB), Bogor, (in Indonesian).

Tavzes C., Kutnar A., 2012. Koncept "kaskade" ali "spirale" uporabe lesa. In: Kitek Kuzman M. Lesene konstrukcije v stanovanjski in javni gradnji: Slovenija. Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo, Fakulteta za arhitekturo: 38

Verheyen M., Beckers W., Claesen E., Moonen G. & Demeester E., 2016. Vision-based sorting of medium density fibreboard and grade A wood waste. In: 2016 IEEE 21st International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA). Presented at the 2016 IEEE 21st International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA) Berlin, Germany: IEEE, 1–6.BUSTOS. Optimisation du procéđe d'aboutage par entures multiples du bois d'épinette noire. Université de Laval. Québec : s.n., 2003.

Vis M., Mantau U., Allen B. (Eds.), 2016. Study on the cascading use of wood. No 394/PP/ENT/RCH/14/7689. Final report. Brussels 2016. 337 p.

WALKER J.C.F., 1993. Primary wood processing. Principle and practice. Chapman & Hall, London, 595 P.

Walker, J. C. F., et R. C. Woollons., 1998. Cell wall 48orms48zation and the properties of xylem – a speculative review. Pages 323–326 in B. G. Butterfield, ed. Proc. IAWA/IUFRO International Workshop on the Microfibril Angle in Wood, University of Canterbury, Christchurch, NZ.

Werner F., Taverna R., Hofer P., Richter K., 2006. Greenhouse gas dynamics of an increased use of wood in buildings in Switzerland. Clim Chang 74:319–347

Zobel, B. J., et J. P. Van Buijtenen., 1989. Wood variation, its causes and control. Springer-Verlag, Berlin, Germany, 363 pp.

## 9. Annexes

Annexe 1. Échantillons numérotés et détecteur de métaux : Electrometer P610 (TS8)



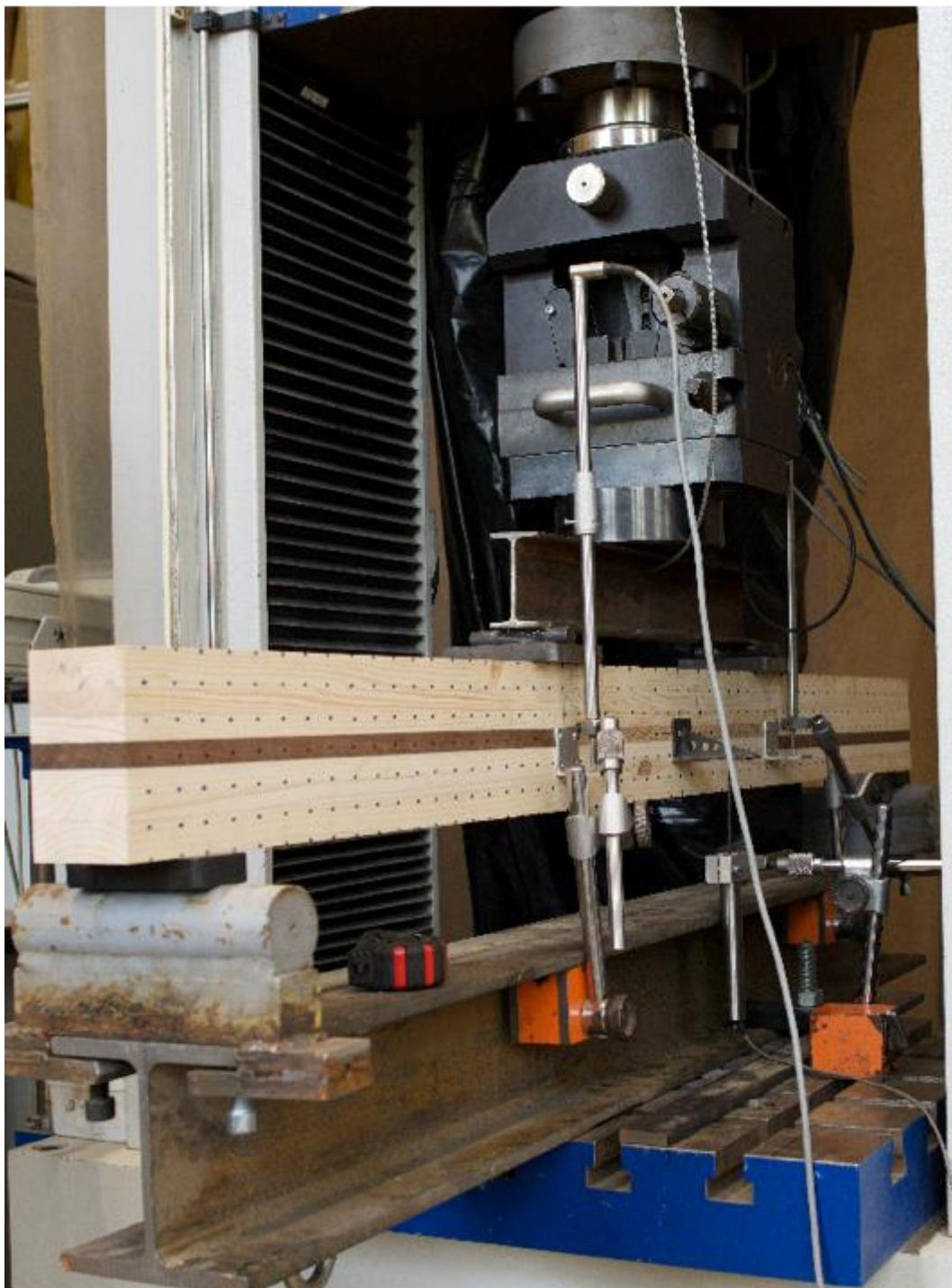
## Annexe 2. Données des essais de flexion simple (C18) grâce à l'Instron 5582

Numéro d'éprouvette	Masse (en g)	Longueur (cm)	Hauteur moyenne (mm)	largeur moyenne (mm)	Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	Charge (N)	Remarques et humidité %
1	1000	105	100	25	3810	3371,94	11,0
2	1093,5	105	100	25	4166	3371,94	11,4
3	1169,3	105	100	25	4454	3371,94	11,3
4	981,2	105	100	25	3738	3371,94	11,0
5	1035,7	105	99	25	3985	3371,94	10,8
6	1083,6	105	99	25	4170	3371,94	10,9
7	1020,9	105	100	25	3889	3371,94	10,9
8	1121,8	105	99	25	4317	3371,94	11,2
9	1412,9	104,8	99	25	5447	3371,94	11,6
10	1063,8	104,9	99	25	4097	3371,94	11,1
11	1130,4	105	99	25	4350	3371,94	11,0
12	1070,6	104,9	100	25	4082	3371,94	11,3
13	1089,2	104,9	100	25	4153	3371,94	11,3
14	1017,8	104,9	99	25	3920	3371,94	11,1
15	1151	105	98	25	4474	3371,94	12,0
16	1294,2	105	100	25	4930	3371,94	11,2
17	1440,2	105,1	98	25	5593	3371,94	11,4
18	1060,8	104,8	99	25	4090	3371,94	11,1
19	1185,1	105	100	25	4515	3371,94	10,9
20	1187,4	105,1	100	25	4519	3371,94	10,7
21	1150,7	105	100	25	4384	3371,94	11,3
22	998,5	104	100	25	3840	3371,94	10,9
23	1296,9	104	100	25	4988	3371,94	11,3
24	1086,2	105	99	25	4180	3371,94	10,9
25	1026,2	105	100	25	3909	3371,94	10,9
26	1134,3	104,6	97	25	4472	3371,94	11,4
27	1211,4	105	100	25	4615	3371,94	11,0
28	1038	104,9	99	25	3998	3371,94	11,0
29	1245,1	104,9	100	25	4748	3371,94	10,7
30	1061,8	104,8	99	25	4094	3371,94	10,8
1	1227,3	151,5	76	25	4264	1444,49	10,7
2	1527,4	151,5	76	25	5306	1444,49	10,9
3	1420,6	151,5	76	25	4935	1444,49	11,2
4	1125,6	151,5	76	25	3910	1444,49	10,9
5	1498,3	151,5	76	25	5205	1444,49	11,2
6	1455,3	151,5	76	25	5056	1444,49	11,0
7	1125,2	151,5	76	25	3909	1444,49	10,9
8	1319,7	151,5	76	25	4585	1444,49	10,8
9	1178	151,5	76	25	4092	1444,49	10,8

Annexe 3. Relevés de température et de l'humidité de l'air lors du collage et du pressage des différents produits

<b>Lors du collage et du pressage</b>	<b>Température (°C)</b>	<b>Humidité (%)</b>
Première partie des plis externes du panneau	18,7	48,1
Deuxième partie des plis externes du panneau	17,5	48,5
Troisième partie des plis externes du panneau	18,8	48
Quatrième partie des plis externes du panneau	17,8	48,4
Premier plis externe du panneau	18,2	46,4
Deuxième plis externe du panneau	19,9	44,6
Panneau	17,5	55,5
Poutre 1	18,5	48,4
Poutre 2	20,9	42,9
Poutre 3	17,2	47,3
Poutre 4	21,6	41,9

Annexe 4. Dispositif de l'essai en flexion simple des poutres BLC



Annexe 5. Dispositif de l'essai en flexion simple du panneau CLT



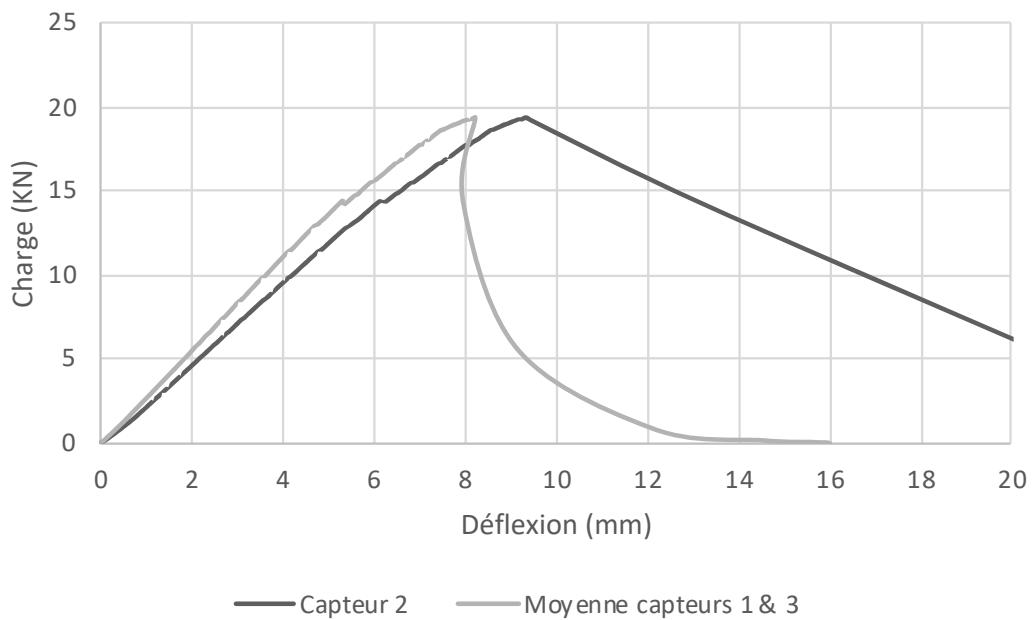
Annexe 6. Résultats de l'analyse des conteneurs de bois A et B issu des recyclages d'Intradel

		Conteneur 1		Conteneur 2		Conteneur 3		Moy. des 3 conteneurs %	Moy. bois valorisables %	Moy. bois valorisable par conteneur %
		Poids (kg)	%	Poids (kg)	%	Poids (kg)	%			
<b>BOIS A</b>	Bois de charpentes & Bois de menuiseries (non traité)	320	9,3%	103	2,8%	50	1,5%	<b>4,5%</b>	<b>55,0%</b>	2,5%
	Meubles en bois massifs sans revêtements	0	0	0	0	0	0			
	Palettes (Euro et autres) non peintes	220	6,4%	160	4,3%	225	6,6%	<b>5,8%</b>	<b>53,3%</b>	3,1%
	Caisses en bois	10	0,3%	8	0,2%	10	0,3%	<b>0,3%</b>	<b>0,0%</b>	0,0%
	Bobines de câbles	0	0	0	0	0	0			
	Bois durs bruts (troncs)	33	1,0%	1	0,0%	2	0,1%	<b>0,3%</b>	<b>0,0%</b>	0,0%
<b>BOIS B</b>	Bois de démolition	0	0	0	0	0	0			
	Bois exotiques	130	3,8%	410	11,1%	13	0,4%	<b>5,1%</b>	<b>16,7%</b>	0,8%
	Panneaux stratifiés / contreplaqué (Multiplex)	150	4,4%	240	6,5%	93	2,7%	<b>4,5%</b>	<b>0,0%</b>	
	OSB / panneaux de particules	1180	34,3%	1530	41,5%	1860	54,3%	<b>43,3%</b>	<b>0,0%</b>	
	LDF / MDF	117	3,4%	98	2,7%	112	3,3%	<b>3,1%</b>	<b>0,0%</b>	
	Bois traités non dangereux / peints / vernis	980	28,4%	880	23,8%	910	26,6%	<b>26,3%</b>	<b>30,0%</b>	7,9%
	Isorel / Hardboard	56	1,6%	5	0,1%	21	0,6%	<b>0,8%</b>	<b>0,0%</b>	0,0%
	Morceaux de petites dimensions et cassés (dominai)	244	7,1%	160	4,3%	110	3,2%	<b>4,9%</b>	<b>5,0%</b>	0,2%
<b>BOIS C</b>	Bois autoclavés et imprégnés de sels métalliques, t	0	0,0%	94	2,5%	16	0,5%	<b>1,0%</b>	<b>0,0%</b>	0,0%
	Autres	5	0,1%	2	0,1%	4	0,1%	<b>0,1%</b>	<b>0,0%</b>	0,0%
	<b>Poids total (kg)</b>	<b>3445</b>		<b>3691</b>		<b>3426</b>				<b>14,5%</b>
	Moyenne Bois A %	10,9%								
	Moyenne Bois B %	88,0%								
	Moyenne Bois C %	1,0%								
	Moyenne Autres %	0,1%								
	Moyenne de bois valorisable %	14,5%								

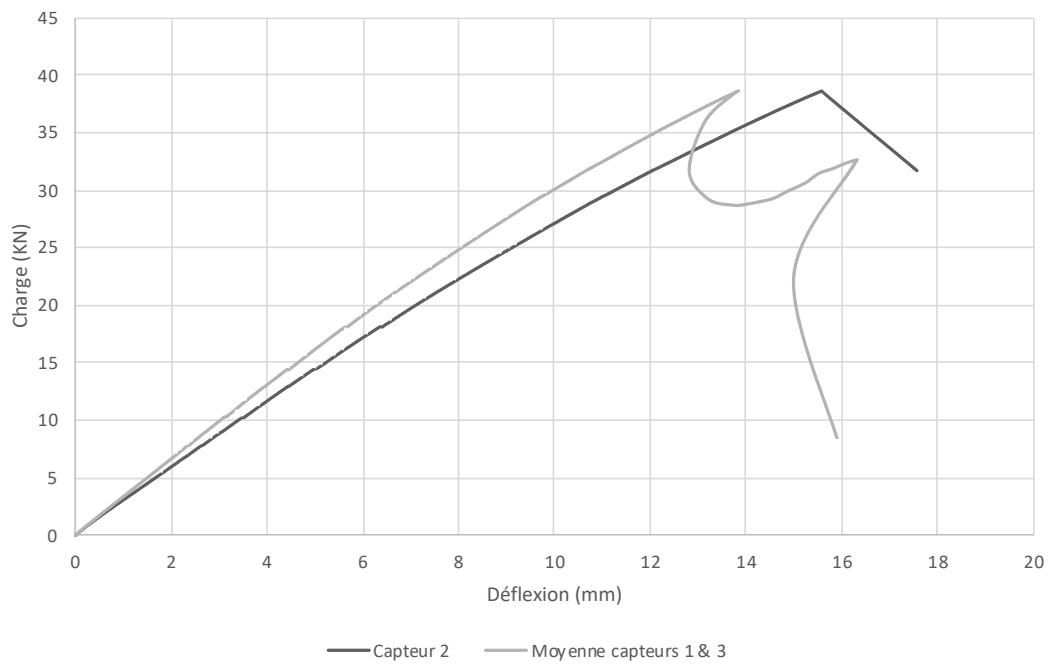
Annexe 7. Pourcentage des types de produits en bois suite à la photo-interprétation des images du contenu des 3 conteneurs pris par drone

	Conteneur 1 (%)	Conteneur 2 (%)	Conteneur 3 (%)	Moy. des 3 conteneurs (%)
<b>Panneaux particules / OSB</b>	32,91	36,94	32,56	34,14
<b>Bois traités</b>	27,81	28,61	41,79	32,73
<b>Palettes</b>	9,69	4,17	5,76	6,54
<b>Panneaux stratifiés / Multiplex</b>	3,83	5,56	4,03	4,47
<b>Bois de menuiseries &amp; charpentes (non traités)</b>	4,08	3,33	1,73	3,05
<b>Bois exotiques</b>	1,79	8,06	0,86	3,57
<b>Isorel / Hardboard</b>	1,02	0,56	1,44	1,01
<b>LDF / MDF</b>	3,06	1,39	4,03	2,83
<b>Caisse en bois</b>	0,51	1,39	0,29	0,73
<b>Bois C</b>	0,00	0,00	0,58	0,19
<b>Autres</b>	0,51	0,00	0,00	0,17
<b>Indéterminé</b>	14,80	10,00	6,92	10,57
<b>Bois A</b>	14,29	8,89	7,78	10,32
<b>Bois B</b>	70,41	73,06	85,01	78,75
<b>Bois C</b>	0,00	0,00	0,58	0,19
<b>Autres</b>	0,51	0,00	0,00	0,17
<b>Indéterminé</b>	14,80	10,00	6,92	10,57

Annexe 8. Courbes charge – déflexion de l'essai de flexion simple de la poutre 1



Annexe 9. Courbes charge – déflexion de l'essai de flexion simple de la poutre 2



Annexe 10. Courbes charge – déflexion de l'essai de flexion simple de la poutre 3



Annexe 11. Courbes charge – déflexion de l'essai de flexion simple de la poutre 4

