

ÉTUDE DE FAISABILITÉ TECHNICO-ÉCONOMIQUE ET EMPREINTE CARBONE DU RECYCLAGE DU BOIS ISSU DE LA CONSTRUCTION, RÉNOVATION ET DÉMOLITION (CRD)

PARTENAIRES FINANCIERS

Forêts, Faune
et Parcs

Québec 


Fondsvert

Gatien Geraud Essoua Essoua, Ph.D.

Patrick Lavoie, M.A, MBA

.....
Juillet 2019

.....
Commissionné par :

Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs du
Québec (MFFP)

Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre
les Changements Climatiques (MELCC)

REMERCIEMENTS

Cette étude a été financée par le ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs et le Fonds Vert pour soutenir le développement des connaissances sur les matériaux à faible empreinte carbone.

**ÉTUDE DE FAISABILITÉ TECHNICO-ÉCONOMIQUE ET
EMPREINTE CARBONE DU RECYCLAGE DU BOIS ISSU DE
LA CONSTRUCTION, RÉNOVATION ET DÉMOLITION (CRD)
RAPPORT TECHNIQUE – 3**

PROJET NUMÉRO : 301013611

APPROBATEUR
Vincent Blanchard, Ph.D., G.D.B.A.
Gestionnaire
Groupe Affaires Réglementaires
Vincent.Blanchard@fpinnovations.ca

RÉVISEUR
Patrick Lavoie, MBA, M.A
Chercheur sénior
Développement durable

AUTEUR
Gatien Geraud Essoua Essoua, Ph.D.
Chercheur
Groupe Affaires Réglementaires
418-781-6745
Geraud.Essoua@fpinnovations.ca

AVERTISSEMENT

FPInnovations ne donne aucune indication ni garantie à quiconque (personne ou entité) quant à l'exactitude, à la rectitude ou à l'exhaustivité de l'information, des données ou de l'analyse de l'information ou des données contenues dans le présent rapport, et ne fournit aucune recommandation, indication ni garantie de quelque nature que ce soit concernant le présent rapport.

Suivez-nous :   

SOMMAIRE

La gestion des résidus en provenance des activités de la construction, rénovation et déconstruction a un impact sur l'environnement. Le gouvernement du Québec, dans son politique de lutte aux changements climatiques, finance différents projets de recherche dans le but de développer des connaissances sur les matériaux à faible empreinte carbone comme le bois. Dans cette vision, le présent projet a été développé et réalisé. Dans un but exploratoire, ce projet avait pour objectif de faire une étude de faisabilité technique, économique et d'évaluer l'empreinte carbone liée à l'utilisation du bois de construction, rénovation et démolition (CRD) dans la production et fabrication en cascade des nouveaux produits de bois. Pour ce faire, les résidus de bois issus de la CRD et fournis par le centre de tri Matrec Inc., ont subi différentes étapes tris et une caractérisation dans le but d'exclure les planches inutilisables (ex. : trop de clous ou vis, dimensions inférieures à 12 pouces, etc.). Les 42 % du bois reçu ont été conditionnés à une teneur en humidité de 15 % avant le début de la fabrication du premier produit de la cascade comme présenté dans la Figure 1 ci-dessous. Dans le processus de la cascade, les produits de chaque scénario constituent la matière première du scénario successif.

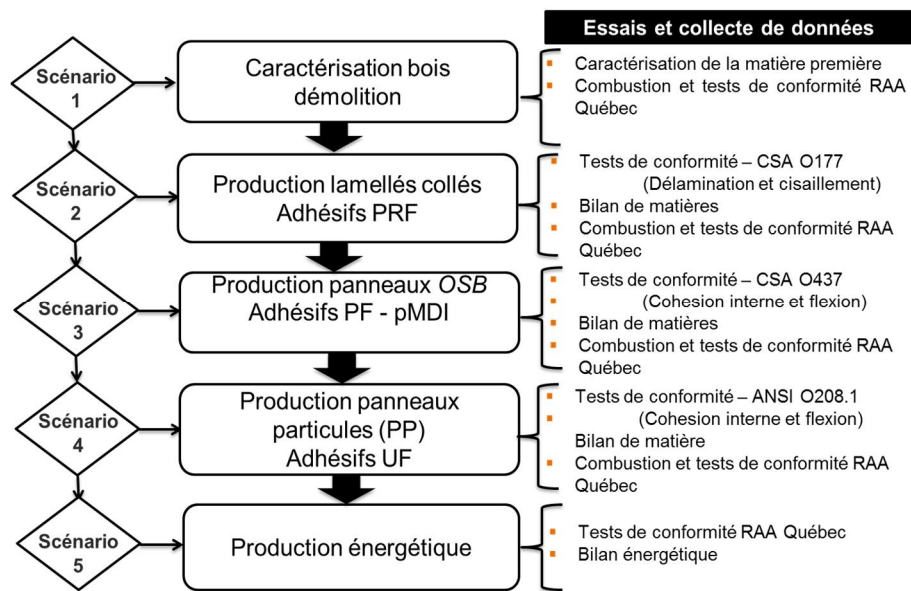


Figure 1. Scénarios du processus de recyclage en cascade

Dans cette première partie du projet, l'objectif était d'analyser la faisabilité technique via la fabrication des produits en laboratoire selon les pratiques courantes de l'industrie, valider la conformité des performances mécaniques après essais et identifier les difficultés liées à fabrication. La fabrication des différents produits de bois a été effectuée dans le respect des paramètres couramment utilisés dans l'industrie exceptée pour les produits panneaux de particules. En effet, la fabrication des panneaux de particules (scénario 4 dans la cascade) a nécessité un ajout de 25 % d'adhésif et un temps de pressage additionnel de près de 50 %.

Les échantillons des produits fabriqués ont été préparés et testés selon les normes en vigueur spécifiques à chaque produit.

Les résultats obtenus indiquent :

- Le module d'élasticité (MOE) du lamellé-collé est 32 % plus bas que la référence normalisée (6 085 MPa versus 9 000 MPa)
- Les panneaux OSB fabriqués en laboratoire ont été plus performants en module de rupture (MOR), MOE et cohésion interne que le panneau OSB de référence 0-2 conformément à la norme CSA O437.
- Les valeurs moyennes obtenues de MOE et MOR des panneaux de particules ont été supérieures à celles du PP classé M-3i conformément à la norme ANSI 208.1. Les valeurs moyennes issues des essais de cohésion interne quant à elles ont été inférieures aux valeurs de référence.

Les essais de caractérisation chimique des échantillons de bois CRD et des produits fabriqués ont indiqué de manière générale, des résultats similaires à ceux de la biomasse vierge publiés dans la littérature scientifique. Cependant, divers éléments chimiques tels que l'azote (N) et le soufre (S) sont davantage présents dans les échantillons des produits de la cascade. En particulier dans les produits panneaux de particules, en raison du contenu en azote des différents adhésifs (PMDI et UF) présents dans la fibre utilisée pour leur fabrication.

L'analyse des émissions potentielles en cas de combustion complète des résidus de la cascade a été faite sur la base des résultats de la caractérisation chimique. Les polluants majeurs identifiés ont été: le dioxyde de carbone (CO₂), le dioxyde de soufre (SO₂), l'oxyde nitrique (NO) et les cendres. Ces polluants majeurs ont été majoritairement présents dans le produit panneau de particules en raison du mélange de fibres utilisées pour sa fabrication, car les fibres utilisées contenaient différents adhésifs utilisés dans la fabrication des produits des scénarios 2 et 3. Toutefois, la présence élevée de quelques composés chimiques dans ce produit en comparaison à la biomasse vierge ne constitue pas une limite dans son utilisation comme combustible biosourcé. En effet, les valeurs des facteurs d'émission (FE) calculés sont dans les intervalles couramment observés dans les essais de combustion de la biomasse.

La deuxième partie du projet avait pour objectif d'analyser la faisabilité économique du système cascade. Ceci a été fait en considérant la production de nouveaux produits de bois à partir d'un mélange de fibres de bois (recyclée et vierge). De ce fait, la composition de fibres retenue, sur la base des pratiques de l'industrie des panneaux, est 20 % de fibres recyclées et 80 % de fibres vierges. L'analyse des coûts de la fibre mixte par rapport aux coûts d'opération des différentes industries indique des coûts marginaux d'opération compris entre 1 % et 13 % en fonction des produits fabriqués (Tableau 1).

Tableau 1. Impact des coûts de la fibre mixte dans les coûts d'opération de l'industrie de bois

Produits	Coûts d'opération	Coûts fibres mixtes	Coûts d'opération ajustés	Marges coûts d'opération
Panneaux de particules	124 \$	28 \$	120 \$	-3,3 %
Cogénération	112 \$	27 \$	106 \$	-5,0 %
OSB	130 \$	44 \$	129 \$	-1,1 %
Bois jointé	530 \$	381 \$	461 \$	-13,1 %
Lamellé-collé	681 \$	300 \$	627 \$	-8,0 %

Dans sa partie 3, le rapport a pour objectif de mettre en évidence les bénéfices environnementaux de l'utilisation de la fibre recyclée dans la fabrication de nouveaux produits de bois. Pour y arriver, une analyse de cycle de vie comparative avec expansion des frontières, des différents produits de la cascade a été effectuée.

L'expansion des frontières inclus la substitution marché. En d'autres termes, la substitution marché considère que le pourcentage de bois recyclé utilisé pour la fabrication d'un produit permet d'éviter l'extraction de matière vierge destinée à la fabrication du même produit. L'analyse a été réalisée en conformité avec la série de normes ISO 14040/44 – 2006 et la norme ISO 14067-2017. Les données analysées sont des données primaires et secondaires issues de différentes sources. Le logiciel de modélisation utilisé est SimaPro v 8 tandis que les principales bases de données considérées sont Écoinvent v 3.0 et USLCI. Les résultats obtenus de l'analyse montrent que le cycle de vie des produits fabriqués à partir de la fibre de CRD ou fibres recyclées a un plus faible fardeau environnemental comparativement aux produits fabriqués à partir de la fibre vierge. L'empreinte carbone du cycle de vie des produits fabriqués à partir de la fibre recyclée est 71 % moins comparativement aux produits fabriqués à partir de la fibre vierge. Le facteur substitution marché augmente d'environ 2 % cet écart entre les émissions GES des différents produits, soit 73 %. Dans le cas de l'analyse de sensibilité, les résultats obtenus montrent des différences relatives non significatives entre les cycles de vie des produits comparés.

En conclusion, l'utilisation de la fibre recyclée dans les processus de fabrication des produits de bois comparativement à l'utilisation de la fibre vierge permet de réaliser des gains économiques et de réduire le fardeau environnemental des produits de bois utilisés dans le bâtiment comparativement à d'autres matériaux comme l'acier, le béton et l'aluminium.

TABLE DES MATIÈRES

SOMMAIRE.....	I
ACRONYMES	IX
1. INTRODUCTION.....	1
2. OBJECTIFS	1
3. PARTIE I : ÉTUDE DE FAISABILITÉ TECHNIQUE DE LA PRODUCTION DES PRODUITS DE BOIS	2
3.1 Objectif I.....	2
3.2 Approvisionnement et caractérisation du bois	3
3.2.1 Source du matériel et méthodes de caractérisation.....	3
3.2.2 Résultats de la caractérisation.....	4
3.3 Essais de préqualification du bois de démolition	8
3.3.1 Préparation des éprouvettes.....	8
3.3.2 Essais de cisaillement et délamination	9
3.3.3 Résultats des essais de cisaillement et délamination	9
3.4 Fabrication du bois lamellé-collé (BLC).....	10
3.4.1 Matériaux utilisés, procédé de fabrication et bilan de matière	10
3.4.2 Le bilan de matière	11
3.4.3 Essais mécaniques.....	13
3.4.4 Résultats et discussion	13
3.5 Fabrication de panneaux à lamelles orientées (<i>OSB</i> en anglais).....	13
3.5.1 Procédé de fabrication	14
3.5.2 Bilan de matière et collecte des données	17
3.5.3 Essais mécaniques sur les panneaux <i>OSB</i> fabriqués.....	19
3.5.4 Résultats et discussion	19
3.6 Fabrication de panneaux de particules.....	22
3.6.1 Procédé de fabrication	22
3.6.2 Difficultés de fabrication des panneaux de particules.....	24
3.6.3 Bilan de matière et collecte des données	24
3.6.4 Essais mécaniques sur les panneaux de particules fabriqués	25
3.6.5 Résultats et discussion	25
3.6.6 Essais mécaniques des panneaux de particules (<i>PP</i>)	25
3.7 Caractérisation chimique et analyse des émissions	32

3.7.1	Caractérisation chimique des échantillons de bois.....	32
3.7.2	Résultats et discussion	33
3.7.2.1	Caractérisation chimique	33
3.7.2.2	Émissions potentielles des polluants majeurs dans l’atmosphère	34
3.8	Conclusions faisabilité technique	35
4.	PARTIE II : ÉTUDE DE FAISABILITÉ ÉCONOMIQUE DE L’INCLUSION DE LA FIBRE RECYCLÉE DANS LES NOUVEAUX PRODUITS DE BOIS	36
4.1	Objectifs II	36
4.2	Analyse économique.....	36
4.3	Conclusions faisabilité économique	39
5.	PARTIE III: ANALYSE DE CYCLE DE VIE (ACV) DES DIFFÉRENTS PRODUITS DE LA CASCADE.....	40
5.1	L’analyse du cycle de vie	40
5.2	Objectifs	41
5.3	Hypothèses.....	41
5.4	Raisons de l’étude.....	41
5.5	Importance et pertinence	42
5.6	Auditoire visé.....	42
5.7	Applications.....	42
5.8	Portée de l’étude	42
5.8.1	Fonctions et unités fonctionnelles.....	42
5.8.2	Frontières du système à l’étude	43
5.9	Méthodologie	50
5.9.1	Qualité et sources de données	50
5.9.2	Procédure d’allocation et fin de vie	50
5.9.3	Incertitude et représentativité des résultats.....	51
5.9.4	Méthode d’analyse d’impacts et catégories d’impacts analysées.....	52
5.9.5	Substitution marché/conséquence environnementale	52
5.9.6	Capture, séquestration et stockage du carbone biogénique	52
5.10	Inventaire du cycle de vie (ICV)	53
5.10.1	Inventaire du produit bois lamellé-collé	53
5.10.2	Inventaire du panneau de lamelles orientées (OSB).....	56
5.10.3	Inventaire du panneau de particules	59
5.10.4	Inventaire de la valorisation énergétique	63

5.11	Analyse de sensibilité.....	65
5.12	Résultats et interprétations	66
5.12.1	Comparaison des profils environnementaux des produits	66
5.12.1.1	Scénario 2 : Bois lamellé-collé	66
5.12.1.2	Scénario 2 : Panneau OSB	67
5.12.1.3	Scénario 4; Panneau de particules.....	68
5.12.1.4	Scénario 5 : cogénération.....	69
5.12.2	Comparaison des profils environnementaux des produits avec effets substitution marché.....	70
5.12.2.1	Scénario 2 : Bois lamellé-collé (BLC)	70
5.12.2.2	Scénario 3 : Panneaux OSB.....	71
5.12.2.3	Scénario 4 : Panneaux de particules (PP)	72
5.12.3	Analyse de sensibilité.....	73
5.12.4	Discussion	76
5.13	Conclusions analyse environnementale.....	76
6.	CONCLUSIONS GÉNÉRALES.....	78
7.	RECOMMANDATIONS	79
8.	LIMITES DE L'ÉTUDE	79
9.	RÉFÉRENCES.....	81
	ANNEXE I - INVESTIGATION OF POTENTIAL EMISSIONS FROM THE COMBUSTION OF CERTAIN MANUFACTURED WOOD PRODUCTS.....	85
	ANNEXE II - REVIEW OF THE LITERATURE RELEVANT TO EMISSIONS FROM THE COMBUSTION OF CERTAIN MANUFACTURED WOOD PRODUCTS.....	99
	ANNEXE III - CRD WOOD RECYCLING IN QUEBEC BUSINESS OPPORTUNITIES REVIEW	113

LISTE DE FIGURES

Figure 1.	Scénarios du processus de recyclage en cascade	i
Figure 2.	Scénarios du processus de recyclage en cascade	2
Figure 3.	Image du bois CRD reçu.....	3
Figure 4.	Planches exclues de l'étude : sous-dimensionnées (A) et présence abondante de clous et/ou vis (B).....	5
Figure 5.	Distribution du type des différentes planches de bois de démolition après le second tri.....	6
Figure 6.	Distribution de longueur (A), largeur (B) et épaisseur (C) différentes planches des bois de démolition après le second tri	7
Figure 7.	Distribution et facteurs de caractérisation visuelle du bois de démolition après le second tri	7
Figure 8.	Dimensions et éprouvettes pour essais de cisaillement	8
Figure 9.	Dimensions et éprouvettes des essais de délamination	9

Figure 10.	Processus d'encollage et serrage des BLCs.....	11
Figure 11.	Bilan de masse et processus de fabrication des BLCs	12
Figure 12.	Préparation des gaufres pour panneaux OSB.....	14
Figure 13.	(A) Mélangeur à gaufres équipé de disque rotatif pour l'application d'adhésif et (B) Presse de laboratoire Dieffenbacher de 450 Tonnes, 1998, no. 3312/7/98-1.....	15
Figure 14.	Bilan de masse et fabrication des panneaux OSB	18
Figure 15.	Comparaison des propriétés mécaniques des panneaux OSB fabriqués en laboratoire au moyen de colles PF ou pMDI versus les valeurs normalisées CSA O437.1 pour les variables suivantes : MOR perpendiculaire (A), MOR parallèle (B), MOE perpendiculaire (C), MOE parallèle (D), cohésion interne (E), où MOR est le module de rupture et MOE est le module d'élasticité	21
Figure 16.	Broyeur à marteaux	22
Figure 17.	Mélangeur pour particules (fabrication maison).....	23
Figure 18.	Bilan de masse et fabrication de panneaux de particules.....	25
Figure 19.	Comparaison des propriétés mécaniques des PP fabriqués en laboratoire versus normalisés ANSI 208.1-2009 : module de rupture (A), module d'élasticité (B), cohésion interne (C).	28
Figure 20.	Comparaison des propriétés mécaniques des PP fabriqués en laboratoire versus normalisés ANSI 208.1-2009 : module de rupture (A), module d'élasticité (B), cohésion interne (C)	31
Figure 21.	Les étapes de l'ACV [24]	40
Figure 22.	Frontières du système.....	43
Figure 23.	Frontière du système de production de bois lamellé-collé issu de la fibre recyclée (A) et de la fibre vierge (B).	45
Figure 24.	Frontière du système de production de panneaux à lamelles orientées issus de la fibre recyclée (A) et de la fibre vierge (B).....	46
Figure 25.	Frontière du système de production de panneaux de particules issus de la fibre recyclée (A) et de la fibre vierge (B).....	47
Figure 26.	Frontière du système de production de chaleur à partir de la fibre recyclée (A) et de la fibre vierge (B).....	48
Figure 27.	Flux de matière et rendements en produits du système cascade	49
Figure 28.	Profil environnemental du bois lamellé-collé.....	67
Figure 29.	Profil environnemental du panneau OSB	68
Figure 30.	Profil environnemental du panneau de particules	69
Figure 31.	Profil environnemental de la cogénération.....	70
Figure 32.	Profil environnemental comparatif du BLC avec substitution marché	71
Figure 33.	Profil environnemental comparatif des panneaux OSB avec substitution marché	72
Figure 34.	Profil environnemental comparatif des panneaux de particules avec substitution marché	73
Figure 35.	Profils environnementaux de l'analyse de sensibilité.....	75

LISTE DE TABLEAUX

Tableau 1.	Impact des coûts de la fibre mixte dans les coûts d'opération de l'industrie de bois	ii
Tableau 2.	Résultats du premier tri du bois de CRD reçu, en masse anhydre et en pourcentage	5
Tableau 3.	Résultats du second tri du bois de CRD reçu (mêmes remarques que pour le Tableau 1)	5
Tableau 4.	Caractéristique et paramètres d'utilisation de l'adhésif PRF pour les éprouvettes et pour les bois lamellés-collés	8
Tableau 5.	Paramètres de fabrication des panneaux OSB	16
Tableau 6.	Résultats des essais de flexion statique et cohésion interne des panneaux OSB fabriqués à partir d'adhésif PF	20
Tableau 7.	Résultats des essais de flexion statique et cohésion interne des panneaux OSB fabriqués à partir d'adhésif pMDI	20
Tableau 8.	Paramètres de fabrication des panneaux de particules.....	23
Tableau 9.	Résultats des essais de flexion statique et cohésion interne des panneaux de particules (100 %) à partir d'OSB_PF.....	27
Tableau 10.	Résultats des essais de flexion statique et cohésion interne des panneaux de particules (100 %) à partir d'OSB_pMDI.....	27
Tableau 11.	Résultats des essais de flexion statique et cohésion interne des panneaux de particules mixtes (20 %-80 %) faits à partir d'OSB-pMDI et de fibres vierges.....	30
Tableau 12.	Résultats des essais de flexion statique et cohésion interne des panneaux de particules mixtes (20 %-80 %) faits à partir d'OSB-PF et de fibres vierges.....	30
Tableau 13.	Éléments ou composants chimiques caractérisés	33
Tableau 14.	Facteurs d'émission des polluants majeurs identifiés.....	34
Tableau 15.	Mélange de masses représentatives pour chaque utilisateur final.....	37
Tableau 16.	Utilisation en fonction du type et qualité de la fibre	37
Tableau 17.	Prix unitaires considérés de fibres issues de différentes sources.....	38
Tableau 18.	Coûts de production à l'unité de différents produits de bois.....	38
Tableau 19.	Coûts de la fibre de bois dans les coûts d'exploitation des industries.....	39
Tableau 20.	Importance du coût de la fibre dans les coûts d'opération des différents producteurs de produits de bois	39
Tableau 21.	Écart minimal requis pour qu'une comparaison des scores d'impacts soit significative	51
Tableau 22.	Inventaire de cycle de vie de 1 m ³ de lamellé-collé fabriqué avec la fibre vierge.....	54
Tableau 23.	Inventaire de cycle de vie de 1 m ³ de panneaux OSB fabriqué avec la fibre vierge	57
Tableau 24.	Inventaire de cycle de vie de 1 m ³ de panneaux OSB fabriqué avec la fibre recyclée.....	58
Tableau 25.	Inventaire de cycle de vie de 1 m ³ de panneaux de particules fabriqués avec la fibre vierge	60
Tableau 26.	Inventaire de cycle de vie de 1 m ³ de panneau de particules fabriqué avec la fibre recyclée.....	62
Tableau 27.	Inventaire pour la production de 1 kWh d'électricité à partir de la biomasse vierge	64
Tableau 28.	Inventaire pour la production de 1 kWh d'électricité à partir de la biomasse issue des résidus de CRD	65

ACRONYMES

ACV	Analyse du cycle de vie
ACV-C	Analyse de cycle de vie conséquentielle
ACV-A	Analyse de cycle de vie attributionnelle
CRD	Construction, rénovation, démolition
BLC	Bois lamellé-collé
ISO	International Organization for Standardization
MFFP	Ministère de la Forêt, de la Faune et des Parcs
MELCC	Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques
EN	Normes européennes
OSB	Oriented Strand Board ou « panneaux de lamelles orientées »
PP	Panneaux de particules
PF	Phénolformaldéhyde
UF	Urée formaldéhyde
PRF	Poly résorcinol formaldéhyde
pMDI	Diisocyanate de diphenylméthylène

1. INTRODUCTION

Le secteur de la construction, rénovation et démolition (CRD) génère environ 41 % de la quantité de matières résiduelles au niveau provincial [1]. En 2015, la quantité de résidus CRD reçus par les centres de tri était estimée à 1,63 million de tonnes. Les résidus de bois sous toute forme constituaient alors 53 % de cette masse. Sortis des centres de tri, les résidus de bois étaient destinés au recyclage (37 %), à la valorisation énergétique (63 %) et à l'incinération (1 %) [2].

Le Gouvernement de Québec, dans sa politique environnementale, accorde depuis longtemps une importance à l'enjeu de la gestion des matières résiduelles ligneuses dans un contexte de lutte aux changements climatiques. En 2002, il envisageait déjà de bannir progressivement le bois de l'élimination par enfouissement [3]. En effet, l'élimination annuelle des résidus engendre 6,7 % des émissions totales de gaz à effet de serre (GES) de la province de Québec [4]. Dans une politique publique de réduction des émissions de GES, l'augmentation des fractions de résidus ligneux récupérées, réutilisées et recyclées (3R) représente donc une option concrète. En plus, l'utilisation de la matière ligneuse recyclée réduit la pression sur les forêts.

L'inclusion du bois de CRD dans la fabrication des produits du bois, dont principalement les panneaux, ne touche encore qu'à 37 % du tonnage de bois reçu dans les centres de tri à travers la province [2]. À titre d'exemple, l'entreprise TAFISA, chef de file au Québec dans l'utilisation du bois CRD pour la fabrication de panneaux de fibres de bois, vise un ratio 50 %-50 % dans la composition de la fibre utilisée, soit 50 % de fibre recyclée et 50 % de fibre vierge, comme le font certaines entreprises au Royaume-Uni [6]. Par ailleurs, le stockage de CO₂ dans les produits de bois représente une opportunité pour réduire la quantité de CO₂ émise dans l'atmosphère [7, 8]. De plus, dans un scénario de recyclage en cascade, l'utilisation des résidus de bois en fin de parcours pour la production énergétique en remplacement de combustibles fossiles, plutôt qu'une élimination sans valorisation énergétique, engendre des réductions d'émissions de GES.

L'utilisation des résidus de bois de CRD dans la fabrication des produits (panneaux de fibres de bois) comparé aux mêmes produits fabriqués à base de fibres vierges pourrait présenter des bénéfices environnementaux importants [5]. L'aspect économique est toutefois aussi un facteur important dans les choix que font les acteurs du secteur forestier en regard à l'utilisation du bois de CRD par rapport à l'utilisation de fibres vierges. Ainsi, l'analyse des coûts liés à la production de divers produits issus du scénario de recyclage en cascade avec un mélange de fibres (recyclée et vierge) est donc nécessaire et complémentaire aux aspects techniques et environnementaux.

2. OBJECTIFS

Le présent projet de recherche s'inscrit dans l'optique du développement des connaissances sur les matériaux à faible empreinte carbone, dont le bois fait partie. Dans le cadre de la mesure 19.4.3 du Plan d'action du Gouvernement de Québec sur les changements climatiques, l'objectif général de ce projet a été d'évaluer la faisabilité technique et économique de la fabrication des produits de bois ainsi que l'empreinte carbone du cycle de vie des produits analysés.

De manière spécifique, le projet visait :

- une étude de faisabilité technique de la production des produits de bois analysés;

- une étude de faisabilité économique de l'insertion d'un pourcentage de fibres recyclées dans les processus de production des produits de bois analysés;
- une analyse de l'empreinte carbone des produits de bois analysés.

Ces trois objectifs spécifiques constituent les trois parties du présent rapport.

3. PARTIE I : ÉTUDE DE FAISABILITÉ TECHNIQUE DE LA PRODUCTION DES PRODUITS DE BOIS

Le processus de recyclage en cascade défini dans le projet comportait cinq scénarios (Figure 2), chacun correspondant à une réalisation au sein de ce processus. La cascade débutait par la caractérisation du bois reçu des centres de tri et se terminait par la production énergétique, avec comme étapes intermédiaires la production de différents produits de bois (bois lamellé-collé, panneaux à lamelles orientés et panneaux de particules). Chaque scénario incluait des essais mécaniques réalisés en conformité avec les différentes normes en vigueur (CAN/CSA 0177-2006, CAN/CSA O86-2014, ASTM D1037 et ASTM D4761) et une caractérisation chimique des échantillons. En l'absence de système de combustion fonctionnel à très petite échelle, les résultats de la caractérisation chimique ont été comparés et discutés en fonction des données issues de la littérature scientifique.

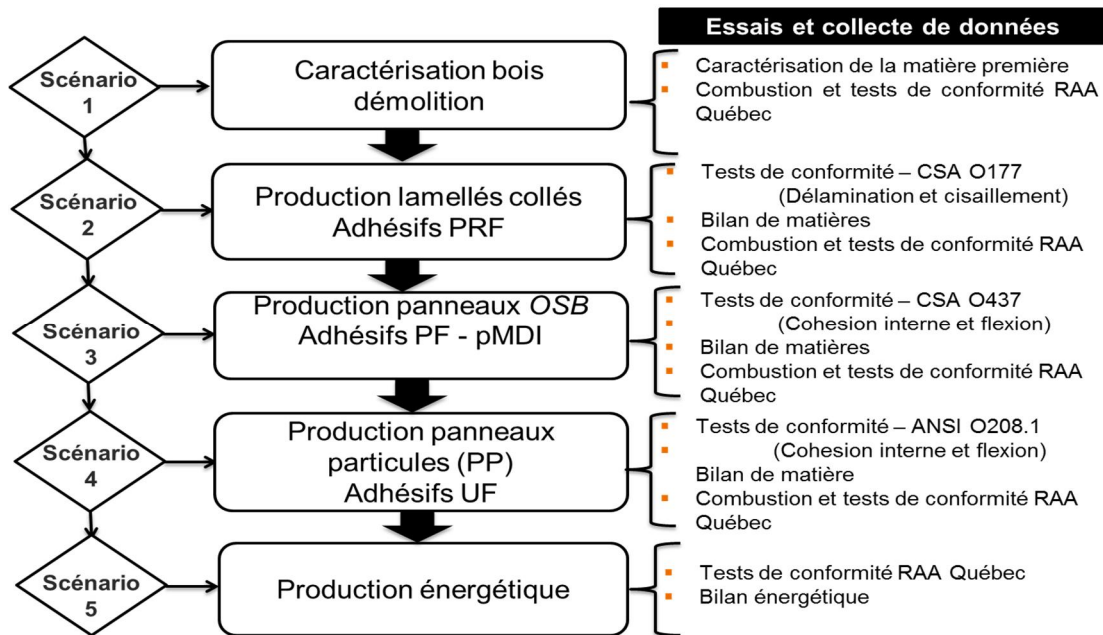


Figure 2. Scénarios du processus de recyclage en cascade

3.1 Objectif I

Cette première partie avait pour objectifs de valider la faisabilité technique de la fabrication de produits de bois à partir de fibres 100 % recyclées et d'identifier les problématiques et les difficultés liées au recyclage multiple ainsi qu'aux procédés de fabrication des différents produits de bois analysés.

3.2 Approvisionnement et caractérisation du bois

3.2.1 Source du matériel et méthodes de caractérisation

Environ 2 m³ de bois de démolition ont été reçus du centre de tri *Matrec inc.* en deux lots distincts. Les morceaux de bois présentaient des dimensions variées, des résidus de gypse, de ciment, du sable en surface et des résidus de métaux (Figure 3).



Figure 3. Image du bois CRD reçu

Le bois reçu provenait quasi exclusivement d'essences résineuses, les essences utilisées dans la construction de bâtiments étant majoritairement les épinettes, les pins et le sapin (EPS). Les travaux de caractérisation ont débuté par la détermination de la teneur en humidité (H %) du bois. Dix échantillons, choisis au hasard dans chaque lot, ont été pesés dans les conditions humides (m_h) et séchés par la suite dans une étuve à une température de 103+/-2 °C jusqu'à équilibre de masse. La masse anhydre (m_0) des échantillons a été déterminée à la fin du séchage et la teneur en humidité a été calculée selon l'équation 1 :

$$H \% = [(m_h - m_0) / m_0] * 100 \quad \text{Équation 1}$$

Les opérations de caractérisation de l'approvisionnement (scénario 1) se sont déroulées en deux étapes de tri pour chaque lot de bois analysé. Les critères de tri étaient fonction des opérations d'usinage à effectuer à partir du scénario 2 du processus de cascade. Toutes les considérations du scénario 1 étaient fonction du scénario 2.

Dans un premier tri, les planches de bois sous-dimensionnées (moins de 0,30 m de long) ou inutilisables pour la production du lamellé-collé (en raison d'une présence trop importante de clous ou vis, de fentes majeures, etc.) ont été exclues des lots (Figure 4).

Au cours du second tri, les résidus métalliques (clous, vis et broches) ont été retirés. Les lots ont ensuite été nettoyés à l'eau pour enlever les résidus de sable, gypse, ciment, etc.

Finalement, chaque planche a été éboutée à la scie radiale et caractérisée selon les critères suivants :

- Type de pièce de bois
 - 2x4
 - 2x6
 - Autres (2x3, 2x8 et 2x10)
- Caractérisation métrique
 - Longueur (mm)
 - Largeur (mm)
 - Épaisseur (mm)
- Caractérisation massique (kg)
- Caractérisation visuelle, présence de (%) :
 - Vis et/ou clous
 - Fentes
 - Pourritures
 - Coloration
 - Peinture
 - Vernis
 - Déformation
 - Bois arraché (sur 1 face ou 2 faces)
- Traitement chimique (oui/non)

Au terme de la caractérisation, les planches ont été rangées sur une palette et placées dans la chambre de conditionnement contrôlé à 75 % d'humidité relative et 20°C de température, ce qui, à l'équilibre, engendre une teneur en humidité de 15 % dans les pièces de bois.

3.2.2 Résultats de la caractérisation

À leur réception, la teneur en humidité moyenne calculée des échantillons de bois au moyen de l'équation 1 était de 20 % de la masse initiale de l'échantillon. Les résultats ci-dessous sont présentés en termes de pourcentage de masse anhydre.

Le premier tri a résulté en l'exclusion de 30 % du lot 1 parce que non utilisable et 6 % parce que sous-dimensionné. Le 64 % résiduel est ainsi passé au second tri. Pour le lot 2, 54 % du bois reçu a été exclu parce que non utilisable et 5 % parce que sous-dimensionné. Le 41 % résiduel est alors passé au second tri.

Le second tri a quant à lui permis d'éliminer les résidus d'éboutage soit 23 % et une quantité de résidus métalliques, soit 0,003 % de la masse totale de bois. Ces pourcentages se sont vérifiés dans les deux lots (1 et 2). Le pourcentage de bois envoyé à la fabrication du produit lamellé-collé (scénario 2) est de 47 % dans le cas du premier lot et de 36 % dans le cas du second lot. De manière générale, en moyenne 42 % de la matière reçue du centre de tri Matrec inc. est donc passée à l'étape de production de bois lamellé-collé.

La caractérisation des planches après le second tri a révélé une dominance de 2x4 par rapport aux autres types de pièces de bois (2x6, 2x8, 2x10, 2x12) (Figure 5). La distribution des dimensions des planches est présentée à la Figure 6a, b et c. Les clous et vis utilisés pour les assemblages de structure lors de la construction étaient présents sur 63 % des planches caractérisées. La présence de trous et de fentes liés à l'utilisation d'éléments

de quincaillerie (clous, vis, etc.) et à la variation de la teneur en humidité du bois a été notée sur 65 % des planches. La coloration, la déformation, le bois arraché et la peinture ont été retrouvés respectivement sur 16 %, 10 %, 14 % et 20 % des planches caractérisées (Figure 7).



Figure 4. Planches exclues de l'étude : sous-dimensionnées (A) et présence abondante de clous et/ou vis (B)

Tableau 2. Résultats du premier tri du bois de CRD reçu, en masse anhydre et en pourcentage

Type de matériel	Lot 1		Lot 2	
	Masse (kg)	Distribution (%)	Masse (kg)	Distribution (%)
Planches inutilisables	150	30	279	54
Planches sous-dimensionnées	28	6	28	5
Second triage	316	64	213	41
Total	494	100	520	100

Tableau 3. Résultats du second tri du bois de CRD reçu (mêmes remarques que pour le Tableau 1)

Type de matériel	Lot 1		Lot 2	
	Masse (kg)	Distribution (%)	Masse (kg)	Distribution (%)
Vis, clous, broche, etc.	0,9	0,003	0,6	0,00
Résidus d'éboutage	69	23	55	23
Conditionnement	234	77	187	77
Total	303	100	242	100

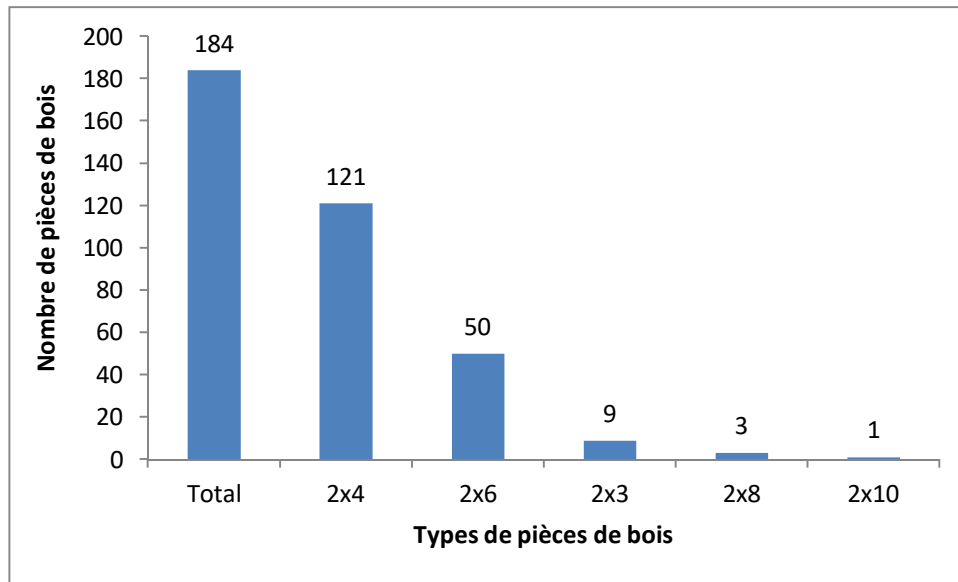


Figure 5. Distribution du type des différentes planches de bois de démolition après le second tri

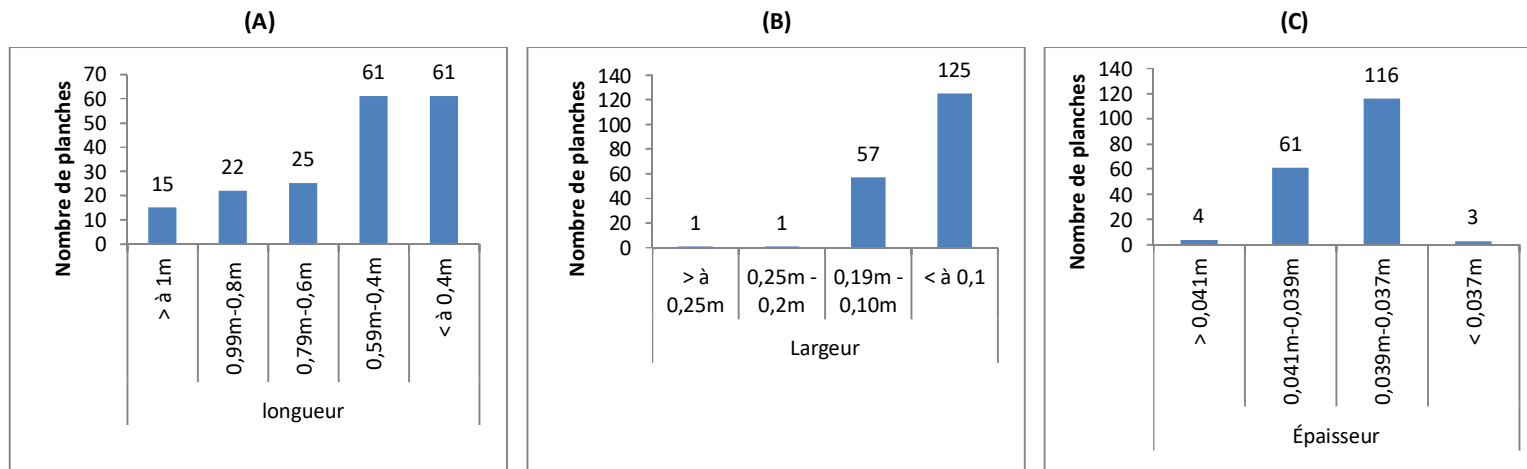


Figure 6. Distribution de longueur (A), largeur (B) et épaisseur (C) différentes planches des bois de démolition après le second tri

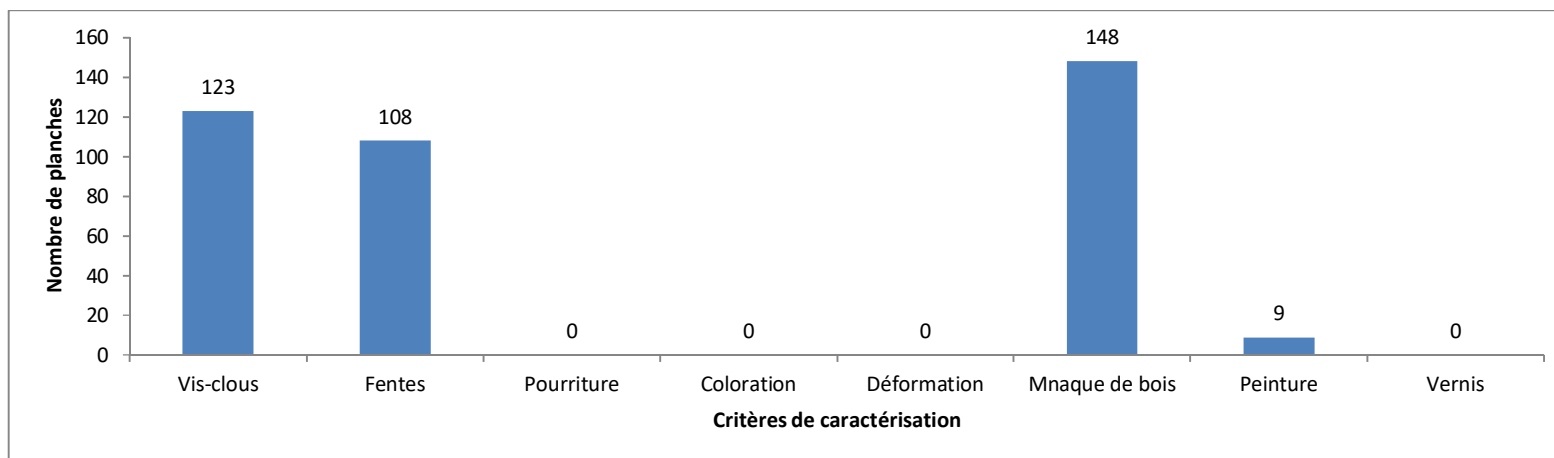


Figure 7. Distribution et facteurs de caractérisation visuelle du bois de démolition après le second tri

3.3 Essais de préqualification du bois de démolition

Les essais de préqualification réalisés avaient pour objectif de s'assurer que le bois de démolition reçu se prêtait bien au collage. Dans cette perspective, des échantillons de bois préparés ont été soumis à des essais de cisaillement et de délamination.

3.3.1 Préparation des éprouvettes

Des planches prises au hasard dans les lots de bois conditionné à une teneur en humidité de 15 % ont été dégauchies, rabotées et sciées. Dans un délai de 24 heures après l'usinage, les planches ont été encollées et serrées. L'adhésif utilisé ainsi que les paramètres d'encollage et de pressage sont indiqués dans le Tableau 4.

Tableau 4. Caractéristique et paramètres d'utilisation de l'adhésif PRF pour les éprouvettes et pour les bois lamellés-collés

Adhésif:	Cascophen™ LT-5210J
Catalyseur :	Cascoset™ FM-6310L
Ratio du mélange adhésif / catalyseur :	2.6/1.0
Grammage :	75-85 lbs/1,000 ft ²
Temps d'assemblage :	Ouverture : variable entre 2-10 minutes Fermeture : variable entre 5-20 minutes
Pression appliquée :	150 PSI (éprouvettes) 150-200 PSI (bois lamellé-collé)
Temps de pressage	Au moins 5 heures

À la fin du pressage, les échantillons ont été découpés en éprouvettes pour les essais de cisaillement et délamination. Ces essais ont été effectués selon la norme CSA 0177-2006. La découpe de 45 éprouvettes pour les essais de cisaillement a été réalisée selon le modèle de type B proposé dans ladite norme (Figure 8).

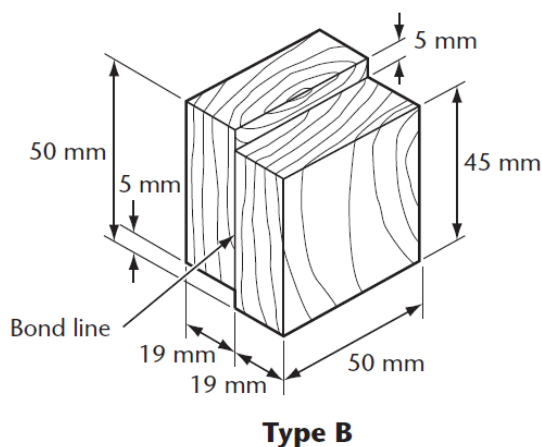


Figure 8. Dimensions et éprouvettes pour essais de cisaillement

En référence à la même norme, la découpe de 4 éprouvettes a été réalisée pour les essais de délamination (Figure 9).

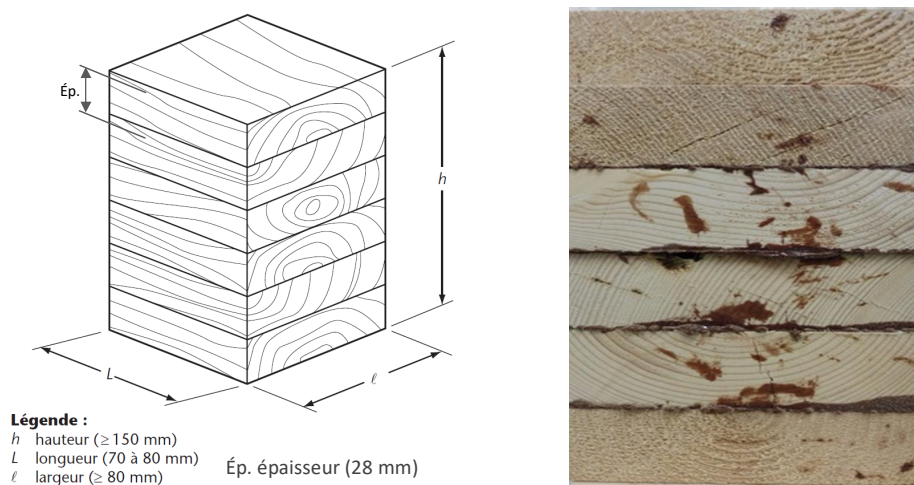


Figure 9. Dimensions et éprouvettes des essais de délamination

3.3.2 Essais de cisaillement et délamination

Les essais de cisaillement ont été effectués selon les paramètres indiqués à la section 9.2.4 de la norme CSA 0177-2006. La vitesse d'application de la charge (N) jusqu'à rupture était de 0,60 mm/min. L'analyse des zones de rupture entre les deux morceaux de l'éprouvette a permis de valider la tenue du collage.

Les essais de délamination ont été effectués selon les paramètres indiqués dans la section 9.3.2.4 de la même norme CSA. Deux cycles d'immersion et séchage ont été effectués. Pour chaque cycle, la masse des éprouvettes a été prise avant et après immersion ainsi qu'après le séchage. Les éprouvettes ont été immergées dans l'eau à une température de 18-27°C. Une pression négative (vide) de 70-85 kPa a d'abord été exercée pendant 30 minutes afin d'enlever de l'air dans le milieu. Par la suite, une pression positive de 480-550 kPa a été exercée pendant 2 heures pour faciliter la pénétration de l'eau dans la structure du bois. À la fin de l'étape de pression, les éprouvettes ont été essuyées et pesées, puis mises en étuve pendant 10-15 heures à une température de 65-75°C pour le séchage. À la fin de l'étape de séchage, les ouvertures observées sur chaque ligne de colle ont été mesurées et la délamination a été estimée en pourcentage. Aux fins d'acceptabilité par la norme CSA utilisée, le pourcentage de délamination ne devait pas dépasser 10 % de la longueur de la ligne de colle. Les résultats sont présentés dans la section suivante.

3.3.3 Résultats des essais de cisaillement et délamination

Les résultats obtenus des essais de cisaillement se sont révélés supérieurs à la valeur acceptable par la norme en vigueur. La force de rupture appliquée sur les éprouvettes variait de 6 à 9 MPa. Avec une moyenne de 7,5 MPa, la force de rupture dépassait de 3,5 fois la valeur (1,75 MPa) de cisaillement longitudinale du lamellé-collé présentée dans la norme de référence CAN/CSA-086. Par ailleurs, l'analyse de la zone de rupture des éprouvettes a indiqué une défaillance dans la fibre et non dans le plan de colle, car la fibre de bois couvrait 99 % ou 100 % de la zone de rupture. Ceci est supérieur au minimum (80 %) indiqué par la norme en vigueur.

Les essais de délamination ont aussi donné d'excellents résultats. Après deux cycles de sorption et désorption réalisés en conformité avec la norme CAN/CSA 0177-06, la délamination était de 0 %, avec l'absence totale d'ouverture des plans de colle des éprouvettes.

Les résultats positifs obtenus après ces essais de préqualification ont permis de procéder à la fabrication du bois lamellé-collé selon le schéma de la cascade.

3.4 Fabrication du bois lamellé-collé (BLC)

Le bois lamellé-collé (BLC) est un produit qui s'obtient par collage de plusieurs lamelles de bois dont le fil est essentiellement parallèle. Le BLC est un produit à usage structural ou non structural. Pour une utilisation structurale, chaque planche de bois qui rentre dans le processus de production du BLC est testée mécaniquement (MSR). Cette pratique permet d'assurer au produit final des propriétés mécaniques conformes à la norme NLGA SPS 2 en vigueur. Toutefois, cette pratique n'a pu être utilisée dans la présente étude en raison de l'origine et des caractéristiques de la matière première.

3.4.1 Matériaux utilisés, procédé de fabrication et bilan de matière

Le bois issu du second tri des lots 1 et 2 a été utilisé pour la fabrication du BLC. Les pièces ont d'abord été conditionnées pendant 10 semaines dans le but d'obtenir une teneur en humidité de 15 %. Pour ce fait le bois a été maintenu dans une atmosphère à 75 % d'humidité relative et 20°C de température. Elles ont par la suite été soumises aux opérations normales de fabrication du BLC, soit l'usinage, l'encollage et le serrage, ainsi que l'équarrissage.

L'usinage du bois consistait à :

Dégauchir : le dégauchissage permet d'enlever les défauts de déformation des planches afin de préparer des surfaces d'appuis pour un meilleur rabotage.

Raboter : le rabotage permet d'obtenir des planches d'épaisseur et de largeur égales. L'épaisseur finale des planches utilisées dans le BLC est de 28 mm.

Scier : le sciage permet de faire une découpe en biseau (inclinaison 45°) pour l'assemblage en longueur des planches du même pli (jointage).

Malgré la préparation des planches lors des étapes préalables, plusieurs clous et vis ont été retrouvés pendant le surfaçage. Ces résidus de métaux peuvent endommager les outils de coupe (lames) des machines d'usinage (dégauchisseuse et raboteuse). Après le rabotage et la coupe en biseau des planches, le collage a été fait dans les 24 heures et dans le respect des indications du producteur d'adhésif (ratio mélange colle – catalyseur, ratio de colle par surface de bois, etc.). Les plats et les bouts (coupes biseau) des planches ont été encollés au moyen de la résine poly résorcinol formaldéhyde (PRF) fournie par Hexion. (Figure 10). Le Tableau 4 présente les caractéristiques et paramètres d'utilisation de l'adhésif. La pression exercée et la durée de pressage y sont aussi mentionnées. Six serre-joints ont été utilisés pour le serrage des BLCs fabriqués avec les bois de types 2''x4'' et 2''x3'', tandis que 12 serre-joints ont été utilisés dans le cas des BLCs réalisés avec les bois de type 2''x6''.

Dans la fabrication du BLC, différents types d'assemblage en longueur des planches sont utilisés. Les plus fréquents sont les joints par enture multiple, les coupes biseaux à différents angles d'inclinaison, etc. À dimensions égales, le principe du collage est d'obtenir une planche dont les propriétés physiques et mécaniques sont égales à celles d'une planche non jointée [9]. Dans le procédé de fabrication, les coupes en biseau à 45° d'inclinaison ont été réalisées pour les assemblages en longueur des planches du même pli.



Figure 10. Processus d'encollage et serrage des BLCs

3.4.2 Le bilan de matière

Le bilan de masse a été fait sur base anhydre. La masse du bois à l'entrée du processus de fabrication des BLCs est de 337 kg. Le rendement en produit BLC est de 55 %. La Figure 10 schématise le processus de fabrication ainsi que le bilan de matière du bois pour chaque opération du processus de fabrication des BLCs. Les opérations d'usinage (rabotage, sciage et équarrissage) éliminent environ 110 kg de matière, soit 33 % de la quantité en début de processus. La masse de bois non utilisée est 42 kg, soit 12 % de la masse en début de processus. Cette quantité de bois a été non utilisée parce que le nombre de BLC nécessaire à la production des panneaux à lamelles orientées (scénario 3) avait été fabriqué. Au total, 14 BLCs de 8 couches et 5 pieds de long ont été fabriqués.

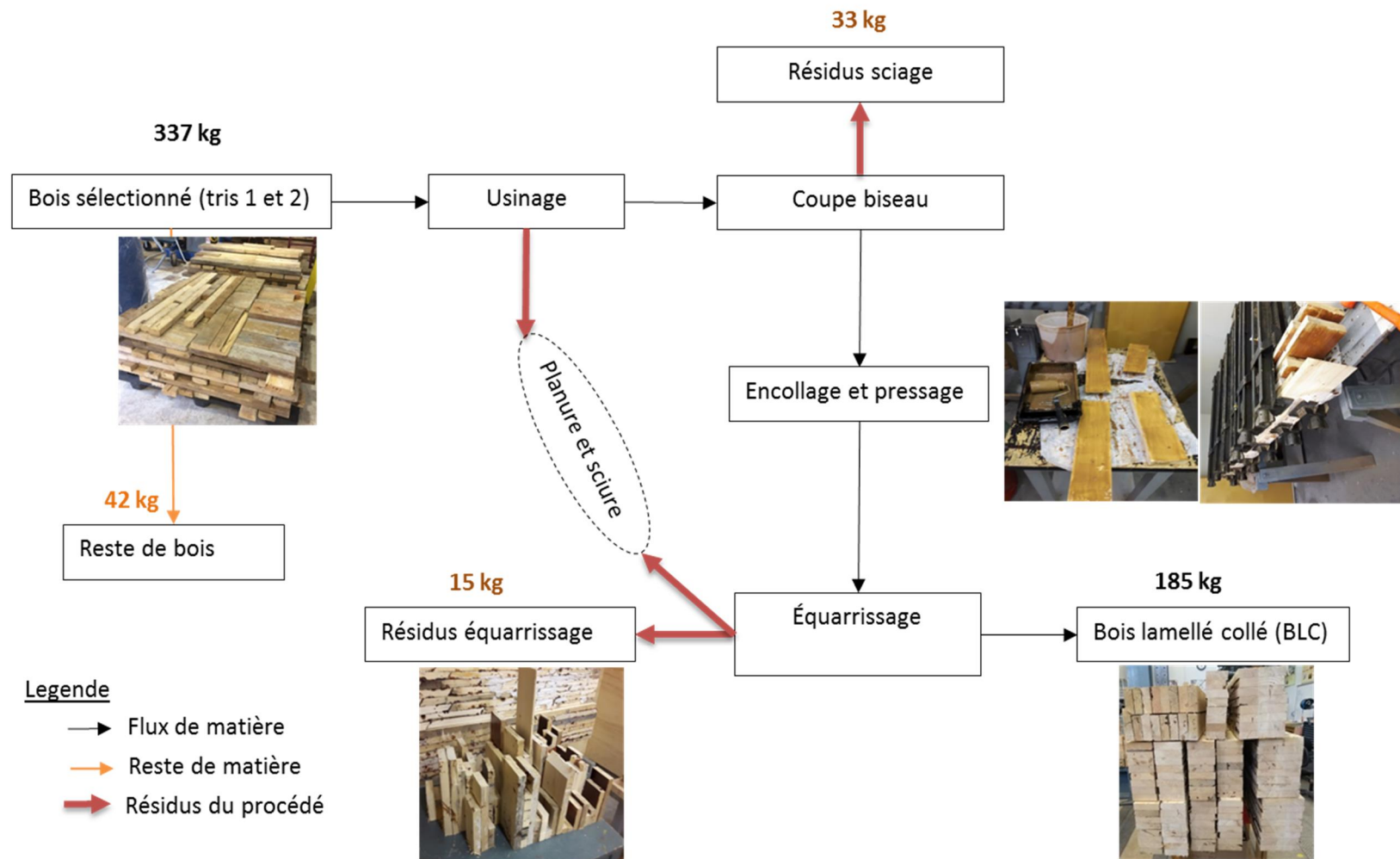


Figure 11. Bilan de masse et processus de fabrication des BLCs

3.4.3 Essais mécaniques

Afin de tester la résistance mécanique des BLCs fabriqués, les essais de flexion statique ont été réalisés en conformité avec la norme CSA 086-2014 [10]. Le module d'élasticité (MOE) a été calculé selon l'équation (2) ci-dessous.

$$E_{app} = \frac{E_{eff,SF}}{1 + \frac{E_{eff,SF}}{KG_{eff}} \left(\frac{h}{L}\right)^2}$$

Équation 2

avec $G=E/16$; $E_{eff} = E_{eff,SF} / \left(1 + \frac{E_{eff,SF}}{KG_{eff}} \left(\frac{h}{L}\right)^2\right)$; $K=5/6$; Typique: $\frac{E}{L} = 1/17$

3.4.4 Résultats et discussion

Dans l'objectif de tester la performance mécanique du produit fabriqué, cette section présente les résultats obtenus des essais mécaniques réalisés sur les échantillons de BLCs fabriqués. Ces résultats sont discutés par rapport à la valeur de performance admissible encadrée par la norme en vigueur CSA 086-2014 [10].

La caractérisation des échantillons de BLCs fabriqués a été effectuée par des essais de flexion statique. Le module d'élasticité (MOE) moyen mesuré est 4 302 MPa (minimum de 3 733 MPa et maximum de 4 879 MPa). Pour des essais de flexion normés, les dimensions des échantillons sont importantes. Le ratio hauteur/longueur (h/L) visé est compris entre 17 et 21 selon la norme ASTM D 4761. En raison de la courte portée des échantillons fabriqués (ratio h/L \approx 6), une correction a été apportée au MOE. Cette correction est reliée aux déformations de cisaillement provoquées par la courte portée. Le facteur de correction moyen utilisé est de 1 508 (minimum 1 503 et maximum 1 512).

Après correction, la valeur moyenne du MOE des échantillons testés a été de 6 085 MPa. Cette valeur moyenne corrigée est de 32 % (soit 2 915 MPa) inférieure à la valeur acceptable de 9 000 MPa en vertu de la norme CAN/CSA086-2014. Cette différence pourrait être causée par divers facteurs :

- Faible propriété mécanique des planches utilisées, car chaque planche n'a pas été testée mécaniquement en raison de leurs petites dimensions ou classée visuellement selon les exigences de la norme CSA O141 intitulée Bois débité de résineux reconnus par l'agence canadienne National Lumber Grade Authority (NLGA)
- Qualité du jointage en bout,
- Incertitude reliée au montage à cause des courtes portées.

Le contrôle de ces trois facteurs pourrait améliorer le MOE et d'autres propriétés comme le MOR des BLCs fabriqués, car le bois de CRD se prête bien au collage.

3.5 Fabrication de panneaux à lamelles orientées (OSB en anglais)

Les panneaux OSB sont des panneaux structuraux couramment utilisés dans le secteur du bâtiment. Dans le cadre du présent projet, la matière première utilisée pour la fabrication de panneaux OSB provient du recyclage des BLCs fabriqués précédemment. Deux types d'adhésifs utilisés dans l'industrie des panneaux OSB ont été sélectionnés pour la fabrication en laboratoire des panneaux OSB.

Il s'agit des adhésifs:

- Phénol-formaldéhyde (PF);
- 4,4 diisocyanate de diphenylméthylène (pMDI).

Le procédé de fabrication des panneaux *OSB* utilisé est détaillé ci-dessous.

3.5.1 Procédé de fabrication

Les panneaux d'*OSB* ont été fabriqués selon le processus industriel standard. Les BLCs, dont la teneur en humidité était de 15 %, ont d'abord été humidifiés en les immergeant dans un bassin d'eau pendant 5 jours. Dans le but de faciliter l'adsorption d'humidité et d'augmenter l'élasticité de la fibre, l'eau contenue dans le bassin a été chauffée à la température de 70°C. À la fin de l'immersion, le processus de fabrication a été le suivant :

- Préparer et sécher les gaufres;
- Peser et encoller les gaufres;
- Préparer les matelas et effectuer le pressage.

La préparation des gaufres a été réalisée via une machine (Carmanah, Design and Manufacturing Inc., 12/48 lab strander, S/N : 10w181). Les BLCs humidifiés ont ainsi été positionnés dans la machine pour la production des gaufres (Figure 12A). Même après caractérisation visuelle, et usinage pour la fabrication des BLCs, le bois gaufré présentait encore des résidus de métaux : clous et vis (Figure 12B). Ces résidus endommagent les outils de coupe, tel que présenté à la Figure 12C, ce qui affecte la qualité des gaufres produites (Figure 12D). Les gaufres ont été séchées, au fur et à mesure de leur production, dans un séchoir rotatif à une température de 120-130°C jusqu'à une teneur en humidité entre 5-7 %.

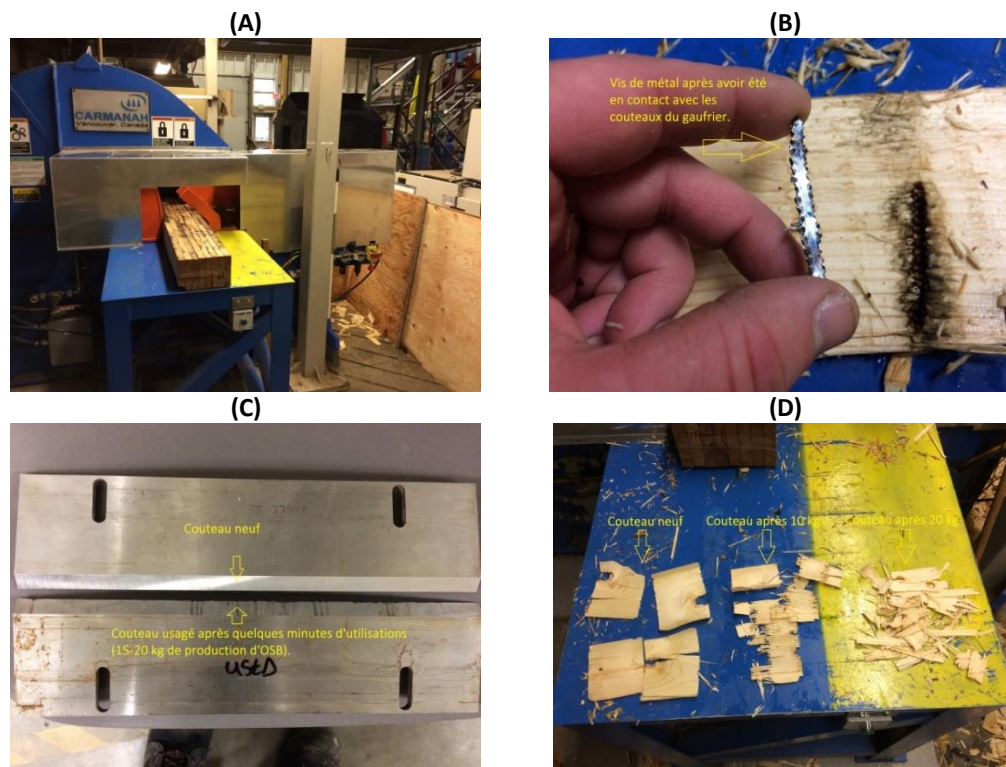


Figure 12. Préparation des gaufres pour panneaux *OSB*

Après le séchage, les gaufres ont été pesées et encollées dans le mélangeur. Les matelas formés ont été pressés à l'aide d'une presse *Dieffenbacher* (Figure 13A). Les paramètres d'utilisation de chaque type d'adhésif, de préparation des matelas et de pressage sont présentés dans le Tableau 5.

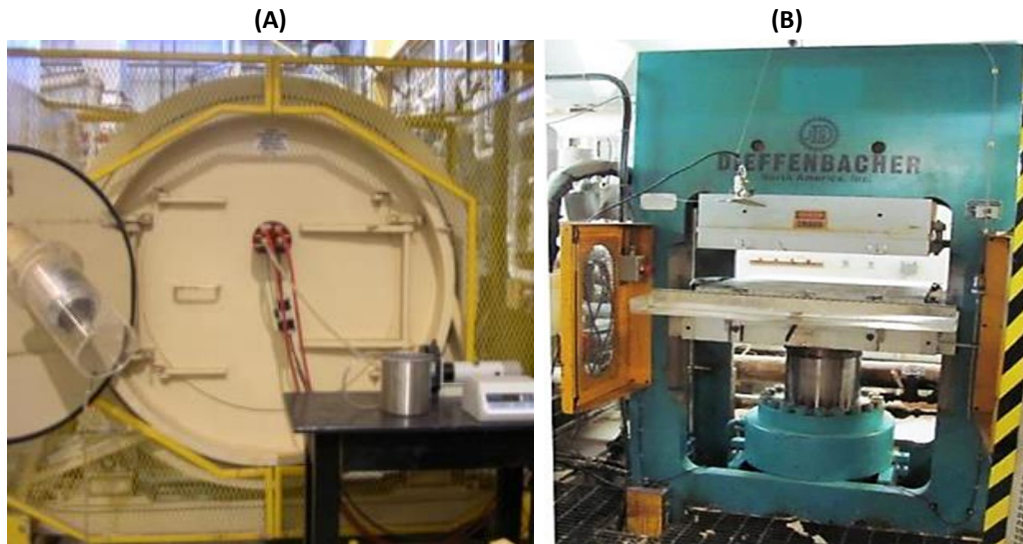


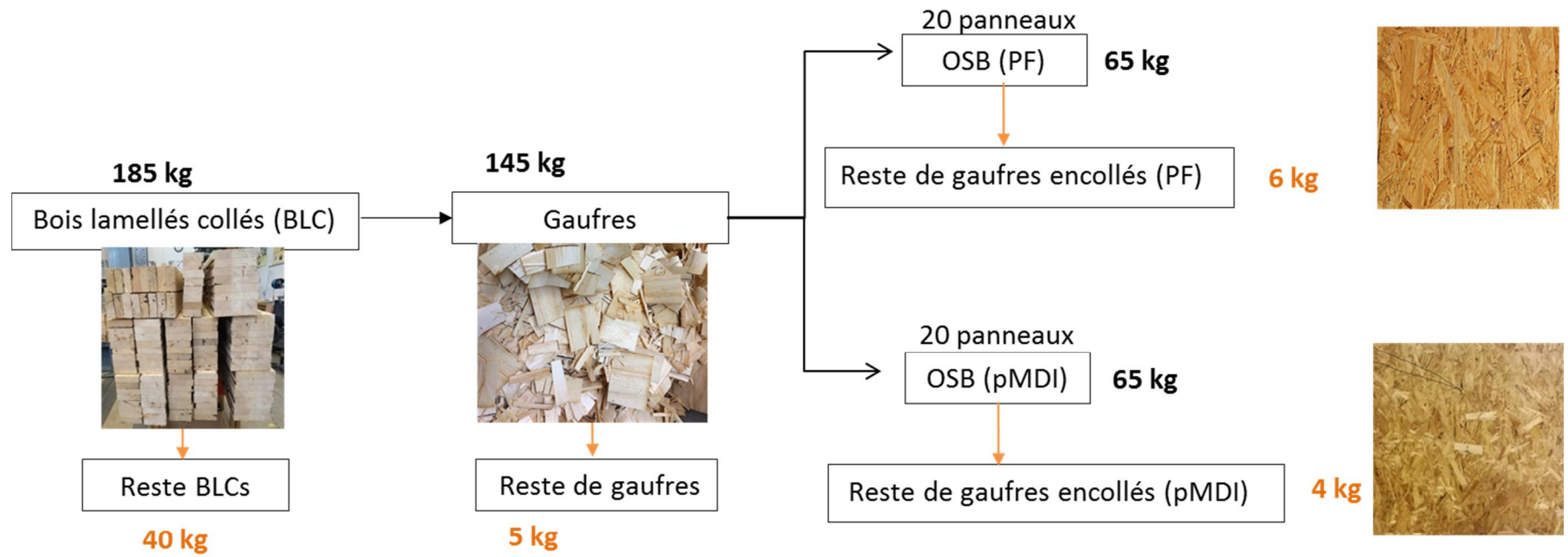
Figure 13. (A) Mélangeur à gaufres équipé de disque rotatif pour l'application d'adhésif et (B) Presse de laboratoire Dieffenbacher de 450 Tonnes, 1998, no. 3312/7/98-1

Tableau 5. Paramètres de fabrication des panneaux OSB

Dimensions	11,1 mm (7/16 po) x 711 mm (28 po) x 711 mm (28 po)
Construction du panneau	Lamelles orientées 27,5 % / 45 % / 27,5 %
Espèce de bois	Sapin – Pin - Épinette pour BLC
Support	Plaques métalliques et papier parchemin
Taux d'humidité cible (après application d'adhésif)	
Panneaux avec adhésif PF	8,0 – 8,5 % couche surface, 3,5 – 4,0 % couche centre
Panneaux avec adhésif pMDI	9,0 – 9,5 % couche surface, 6,5 – 7,0 % couche centre
Teneur en adhésif Panneaux LPF	3,45 % PF couche surface, 3,15 % LPF couche centre (base sèche), identifiés 1 à 20
Panneaux pMDI	3,0 % pMDI couche de surface et centre, identifiés A à T
Teneur en cire	1 % couche de surface et centre
Système d'application de la cire	Buse à air
Vitesse de rotation du mélangeur	20 - 22 rpm (pour la cire et l'adhésif)
Pression d'air pour l'application de la cire	30 psi
Quantité de gaufres par mélange	20 kg gaufres de surface, 15 kg gaufres de centre
Système d'application d'adhésif	Disque rotatif
Débit d'adhésif lors de l'application	230 ml/minute
Vitesse de rotation du disque	10 000 rpm
Séquence d'application	Cire- Adhésif
Densité de panneau cible	40 lb/ft ³ (out of press)
Brume d'eau appliquée sur le dessus du matelas	47 - 55g/m ²
Température de plateau de presse	215-218°C
Temps de presse total	
Panneaux PF	155 secondes (daylight to daylight)
Panneaux pMDI	140 secondes (daylight to daylight)
Temps pour atteindre l'épaisseur cible	
Panneaux PF	35-38 secondes
Panneaux pMDI	22-25 secondes
Temps de dépressurisation du panneau	15 secondes
Duplicata	20 panneaux par adhésif

3.5.2 Bilan de matière et collecte des données

La masse de BLC impliquée dans la production des gaufres est de 185 kg (masse anhydre). Le rendement en produit panneaux OSB est de 70 %. La quantité de gaufres produites est 145 kg. Les pièces de bois à passer dans la machine pour la production des gaufres doivent avoir une longueur minimale (> 8 pouces) pour des raisons de sécurité des opérateurs. À cet effet, tous les bouts obtenus à la fin du gaufrage de chaque BLC constituent le reste BLC (Figure 14). Ce reste de BLC non gaufré avait une masse de 40 kg. Les gaufres produites ont permis la fabrication de 40 panneaux *OSB* pour un total de 130 kg en raison de 3,2 kg/panneau de 24 pouces x 24 pouces. Toute la quantité de gaufres mélangées avec l'adhésif n'a pas été utilisée à la fabrication des panneaux. Le reste de gaufres encollées ont une masse de 10 kg tandis celles non encollées ont une masse de 5 kg (Figure 14).



Légende

- Flux de matière
- Reste de matière

Figure 14. Bilan de masse et fabrication des panneaux OSB

3.5.3 Essais mécaniques sur les panneaux OSB fabriqués

Fabriqués selon la configuration des panneaux commerciaux, les échantillons des panneaux *OSB* ont été préparés et conditionnés à une teneur en humidité entre 8-9 %. Dans le but de s'assurer de leur conformité technique, les échantillons ont ensuite été testés selon la norme canadienne en vigueur CSA O437.1 et la norme ASTM 1037-12 [12] [13]. À ce titre, les essais de flexion statique ont été réalisés pour déterminer le module d'élasticité (MOE) et le module de rupture (MOR). Pour chaque module, la force a été appliquée en direction perpendiculaire et parallèle aux fibres de bois des échantillons testés. Des essais de traction ont aussi été réalisés pour évaluer la cohésion interne des échantillons. Les résultats obtenus sont présentés dans la section ci-dessous.

3.5.4 Résultats et discussion

Cette section présente les résultats obtenus des différents essais mécaniques réalisés sur les panneaux *OSB* fabriqués. Ces résultats sont discutés par rapport aux valeurs de performances admissibles encadrées par les normes respectives en vigueur.

Les essais de flexion statique sur les échantillons de panneaux *OSB* ont été effectués selon la norme CSA O437.1, laquelle réfère à la norme ASTM D1037 en ce qui a trait à la méthode. Les résultats sont présentés en deux tableaux en fonction du type d'adhésif (PF ou pMDI) utilisé pour l'encollage des fibres.

Les panneaux *OSB* encollés avec l'adhésif PF (*OSB_PF*), ont présenté une valeur moyenne de 2 444 MPa du module d'élasticité perpendiculaire aux fibres (MOE perp.) et de 5 470 MPa du module d'élasticité parallèle aux fibres (MOE paral.). La valeur moyenne du module de rupture perpendiculaire aux fibres (MOR perp.) a été de 22,8 MPa et celle du module de rupture parallèle aux fibres (MOR paral.), de 36,6 MPa. Les essais de cohésion interne ont indiqué une valeur moyenne de 0,4 MPa avec une fracture dans le centre du panneau (Tableau 6).

Les panneaux *OSB* encollés avec l'adhésif pMDI (*OSB_pMDI*), ont présenté une valeur moyenne de 3 175 MPa du module d'élasticité perpendiculaire aux fibres (MOE perp.) et de 5 397 MPa du module d'élasticité parallèle aux fibres (MOE paral.). La valeur moyenne du module de rupture perpendiculaire aux fibres (MOR perp.) a été de 29,4 MPa et celle du module de rupture parallèle aux fibres (MOR paral.), de 38,8 MPa. Les essais de cohésion interne ont indiqué une valeur moyenne de 0,59 MPa avec une fracture dans le centre des échantillons (Tableau 7).

Les valeurs moyennes obtenues en laboratoire ont été comparées à celles de la norme de référence CSA O437.1 (Figure 15). Il s'avère que les panneaux *OSB* fabriqués en laboratoire ont été plus performants en MOR, MOE perpendiculaire et en cohésion interne, que l'*OSB* de référence 0-2. Par ailleurs, les *OSB_pMDI* ont mieux performé mieux que les *OSB_PF*.

Tableau 6. Résultats des essais de flexion statique et cohésion interne des panneaux OSB fabriqués à partir d'adhésif PF

Composition	Valeurs calculées	Perpendiculaire			Parallèle			Cohésion Interne densité (kg/m ³)	Cohésion Interne (MPa)	Description de la fracture
		MOR/MOE* densité (kg/m ³)	MOR* (MPa)	MOE* (MPa)	MOR/MOE densité (kg/m ³)	MOR (MPa)	MOE (MPa)			
3,45 % PF (face) 3,15 % PF (cœur)	Moyenne	652	22,8	2444	657	36,6	5470	639	0,4	cœur
	Écart Type	28	3,1	349	14	6,5	626	12	0,1	
	Coefficient de variation	4	14	14	2	18	11	2	19	

* Module de rupture (MOR) et module d'élasticité (MOE)

Tableau 7. Résultats des essais de flexion statique et cohésion interne des panneaux OSB fabriqués à partir d'adhésif pMDI

Composition	Valeurs calculées	Perpendiculaire			Parallèle			Cohésion Interne densité (kg/m ³)	Cohésion Interne (MPa)	Description de la fracture
		MOR/MOE* densité (kg/m ³)	MOR* (MPa)	MOE* (MPa)	MOR/MOE densité (kg/m ³)	MOR (MPa)	MOE (MPa)			
3 % pMDI (face) 3 % pMDI (cœur)	Moyenne	663	29,4	3175	635	38,8	5397	630	0,59	cœur
	Écart Type	27	3,7	255	19	2,6	549	12	0,13	
	Coefficient de variation	4	13	8	3	7	10	2	23	

* Module de rupture (MOR) et module d'élasticité (MOE)

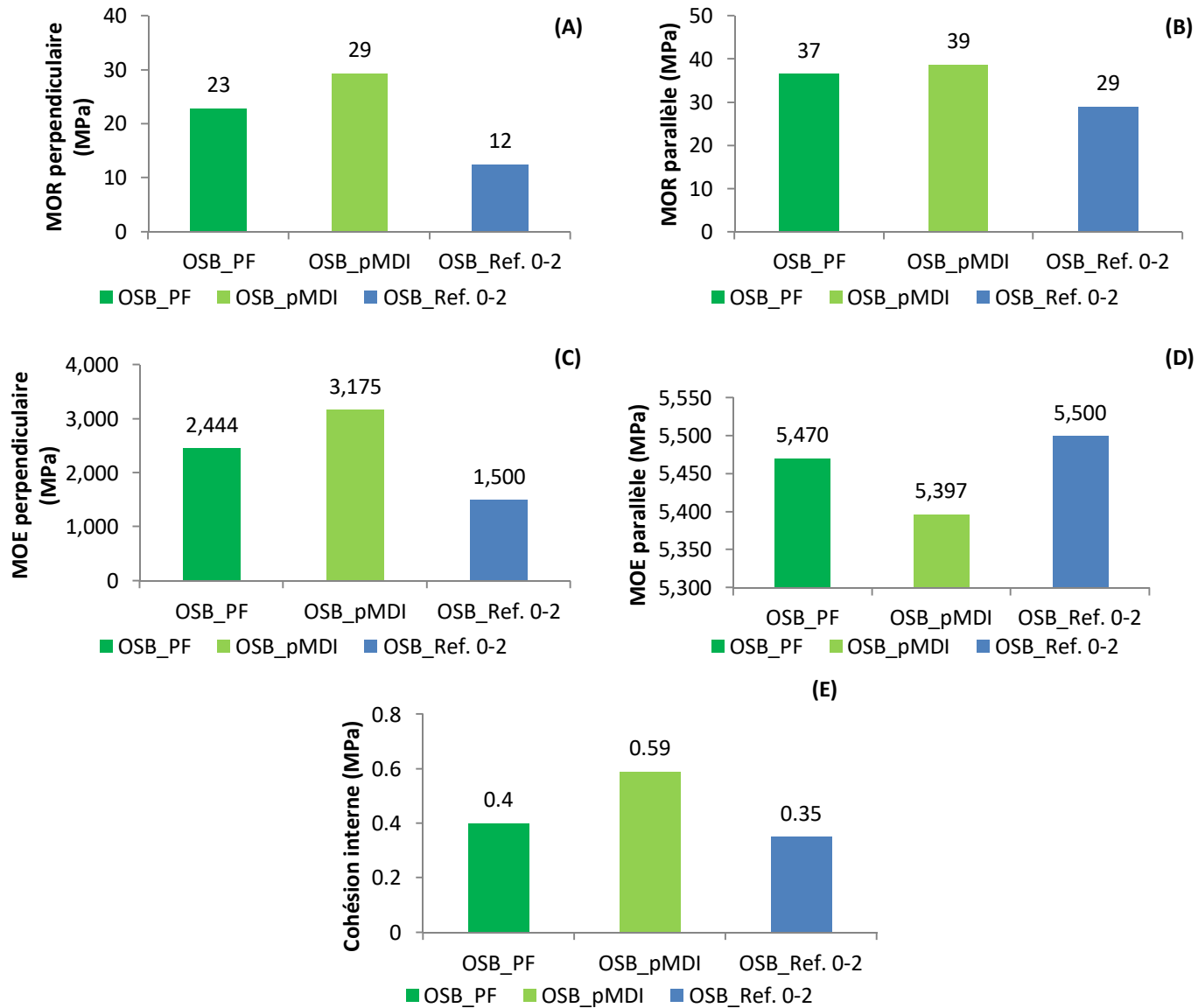


Figure 15. Comparaison des propriétés mécaniques des panneaux OSB fabriqués en laboratoire au moyen de colles PF ou pMDI versus les valeurs normalisées CSA O437.1 pour les variables suivantes : MOR perpendiculaire (A), MOR parallèle (B), MOE perpendiculaire (C), MOE parallèle (D), cohésion interne (E), où MOR est le module de rupture et MOE est le module d'élasticité

3.6 Fabrication de panneaux de particules

Les panneaux OSB ont été sciés en bandes et broyés pour la production des particules à l'aide d'un broyeur à marteaux (Figure 16). Différentes tailles de particules ont été produites au moyen des treillis :

- les particules de face ont une taille de 1/16 pouce pour les panneaux OSB produits avec l'adhésif PF et 1/8 pouces pour ceux produits avec l'adhésif pMDI;
- les particules de cœur ont une taille de 1,5 pouce.



Figure 16. Broyeur à marteaux

3.6.1 Procédé de fabrication

La fabrication des panneaux de particules a été réalisée en trois étapes :

- Encoller des particules
- Préparer des matelas
- Presser à chaud

La fabrication a été faite par type d'adhésif (PF ou pMDI) utilisé dans la production des panneaux OSB. L'adhésif utilisé dans la fabrication des panneaux de particules est l'urée formaldéhyde (UF). Les ratios d'UF ajoutés à la fibre issue des panneaux OSB sont fonction des couches de face ou de cœur. Le mélangeur utilisé dans l'étape d'encollage est présenté dans la Figure 17. À la fin du mélange adhésif-fibres, les matelas sont formés et pré pressés dans un moule. Démoulés par la suite, ils sont pressés à chaud au moyen d'une presse à panneaux. Les ratios d'adhésif ainsi que les paramètres de pressage sont présentés dans le Tableau 8.



Figure 17. Mélangeur pour particules (fabrication maison)

Tableau 8. Paramètres de fabrication des panneaux de particules

Dimensions des panneaux	12.7 mm (1/2 po) x 610 mm (24 po) x 610 mm (24 po)
Type de panneaux	Trois couches
Distribution de masse (%)	20/60/20 surface/centre/surface (base sèche)
Support	Plaque métallique en dessous et au-dessus du matelas
Teneur en adhésif	Surface : 10 % and 12 % (matière solide sur base sèche de bois) Centre : 6,5 % and 8 % (matière solide sur base sèche de bois)
Teneur en cire	Surface : 1,0 % (sur base sèche de bois) Centre : 1,0 % (sur base sèche de bois)
Teneur en durcisseur	Surface : 0,3 % and 1 % (sur base sèche de bois) Centre : 0,6 % and 2 % (sur base sèche de bois)
Teneur en humidité cible	Surface : 9 % ± 0,5 % Centre : 6,5 % ± 0,5 %
Pression d'air pour l'application de l'adhésif	50 psi (pratique de laboratoire)
Débit d'adhésif	150 ml/min (pratique de laboratoire)
Densité de panneaux cibles	45 et 47 lbs/ft ³ or 720 et 753 kg/m ³ (sur base sèche de bois)
Dimension du mélangeur	3 pi (diamètre) x 3 pi (profondeur) ou 914 mm x 914 mm
Température des plateaux de presse	185 °C
Temps pour atteindre l'épaisseur cible	Le plus rapidement possible (environ 20 secondes)
Temps de pressage total	150 à 230 secondes
Temps de dépressurisation du panneau	20 secondes
Répétitions	10

3.6.2 Difficultés de fabrication des panneaux de particules

Le produit « panneaux de particules (PP) » se situait au troisième niveau des scénarios de la cascade utilisé dans le cadre du présent projet. Sa fabrication dans le respect des paramètres classiques de l'industrie a présenté un défi considérable. La principale cause répertoriée est l'utilisation de particules de bois contenant déjà un mélange d'adhésif (PRF et PF ou PRF et pMDI). Il s'avère en effet que le mélange d'adhésifs au pH acide et basique n'offre pas le milieu propice à la réaction chimique de l'adhésif UF utilisé pour la fabrication des panneaux de particules.

Après l'encollage, le premier essai de PP pressé pendant 150 secondes était entièrement ouvert. Le deuxième essai de panneaux pressés pendant 180 secondes a présenté le même résultat. Le troisième essai, pressé pendant 210 secondes, a donné des résultats de cohésion interne testée à chaud de 0,024 MPa. Cette valeur est inférieure à celle exigée pour les PP de grade M considérés comme comparables (entre 0,31 MPa et 0,5 MPa) [14]. Après variation du temps de pressage, sans résultat conforme à la norme ANSI 208.1-2009 en vigueur, la variation des deux autres paramètres suivants a été envisagée.

- Ratio de colle : pour exclure l'hypothèse d'insuffisance d'adhésif :
 - Surface : de 10 % à 12 % (+25 %)
 - Centre : de 6,5 % à 8 % (+23 %)
- Ratio de catalyseur : pour neutraliser le milieu basique car l'adhésif UF performe bien en milieu acide :
 - Surface : de 0,3 % à 1 % (+230 %)
 - Centre : de 0,6 % à 2 % (+230 %)

Les panneaux fabriqués successivement ont été pressés dans un intervalle de temps compris entre 150 secondes et 230 secondes en fonction qu'ils soient produits à partir de fibres issues de panneaux *OSB*-pMDI ou de panneaux *OSB*-PF. Pour les PP fabriqués à partir d'*OSB*-PF, la densité cible a été augmentée à 763 kg/m³ (+10 %) comparativement à 691 kg/m³ pour les PP à base d'*OSB*-pMDI.

3.6.3 Bilan de matière et collecte des données

La quantité de panneaux *OSB* broyée pour la production des particules de face et de cœur a été de 130 kg. Le rendement en produit panneaux de particules est de 54 %. Le broyage de 65 kg de panneaux *OSB* fabriqués avec l'adhésif PF a généré 22 kg de particules de face et 27 kg de particules de cœur. Cette quantité de matière a permis la fabrication de 12 PP (masse totale 38 kg). Le reste de particules encollées et non encollées issu d'*OSB* fabriqué avec l'adhésif PF a été respectivement de 11 kg et 16 kg. Par ailleurs, le broyage de 65 kg de panneaux *OSB* fabriqués avec l'adhésif pMDI a généré 23 kg de particules de face et 27 kg de particules de cœur. Cette quantité de matière a permis la fabrication de 10 PP (masse totale 32 kg). Le reste de particules encollées et non encollées issu d'*OSB* fabriqué avec l'adhésif pMDI a été respectivement de 18 kg et 15 kg (Figure 18).

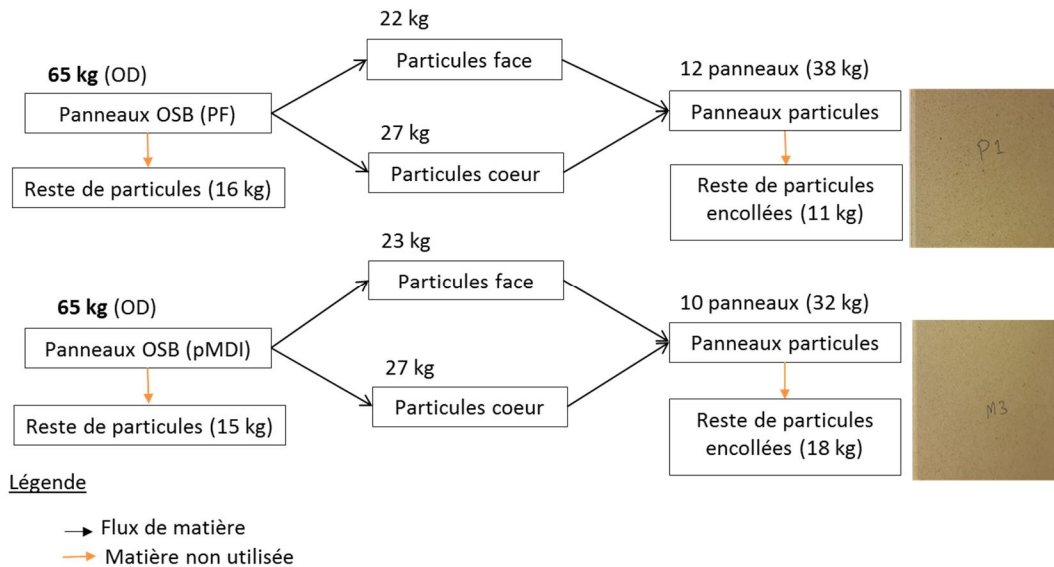


Figure 18. Bilan de masse et fabrication de panneaux de particules

3.6.4 Essais mécaniques sur les panneaux de particules fabriqués

Fabriqués selon la configuration des panneaux commerciaux, les échantillons de PP ont été préparés et conditionnés à une teneur en humidité entre 8-9 %. Ils ont ensuite été testés selon les normes en vigueur ANSI A208.1-2009 dans le but de s'assurer de leur conformité technique [14]. À ce titre, les essais de flexion statique ont été réalisés pour déterminer le module d'élasticité (MOE) et le module de rupture (MOR). Des essais de traction ont aussi été faits pour évaluer la cohésion interne des échantillons. Les résultats obtenus sont présentés dans la section ci-dessous.

3.6.5 Résultats et discussion

Cette section présente les résultats obtenus des différents essais mécaniques réalisés sur les produits de bois fabriqués. Ces résultats sont discutés par rapport aux valeurs de performances admissibles encadrées par les normes respectives en vigueur [14]. Les panneaux de référence sont des panneaux de grade industriels couramment utilisés dans l'industrie du meuble. Les grades industriels considérés sont M-0, M-1, M-S, M-2 et M-3i. Les propriétés mécaniques (MOR, MOE et cohésion interne) diffèrent par d'un grade à un autre. Ces propriétés sont croissantes du grade M-0 au grade M-3i et influencent la tenue des vis qui est une propriété très importante dans l'industrie du meuble. Tout comme les propriétés mécaniques, la tenue des vis augmente avec le grade. Dans la présentation des résultats ci-dessous, la considération dans le même graphique de comparable permet de donner un aperçu global de la position des produits fabriqués en laboratoire par rapport aux différents grades normalisés.

3.6.6 Essais mécaniques des panneaux de particules (PP)

Comme pour les panneaux OSB, les PP ont été testés selon la norme de référence ANSI A208.1, laquelle réfère à la norme ASTM D1037 pour la méthode [14] [13]. Les résultats obtenus des essais sont présentés en deux tableaux en fonction de l'adhésif utilisé dans la fabrication des panneaux OSB dont les fibres ont servi de matière première à la fabrication des PP.

Les PP fabriqués à partir des panneaux OSB qui contiennent l'adhésif PF (OSB-PF) ont présenté une valeur moyenne du module d'élasticité (MOE) de 3 383 MPa. La valeur moyenne du module de rupture (MOR) a été de 15,8 MPa. Les essais de cohésion interne ont indiqué une valeur moyenne de 0,28 MPa avec une fracture dans le centre des échantillons (Tableau 9).

Les PP fabriqués à partir des panneaux OSB qui contiennent l'adhésif pMDI (OSB-pMDI) quant à eux ont présenté une valeur moyenne du module d'élasticité (MOE) de 2 183 MPa. La valeur moyenne du module de rupture (MOR) a été 10,2 MPa. Les essais de cohésion interne ont indiqué une valeur moyenne de 0,29 MPa avec une fracture dans le centre des échantillons (Tableau 10).

Les valeurs moyennes obtenues en laboratoire ont été comparées à celles de la norme de référence ANSI 208.1-2009 (Figure 18). Les PP issus d'OSB-PF ont mieux performé que les PP issus d'OSB-pMDI en raison de la densité plus élevée (763 kg/m³ versus 691 kg/m³). Les valeurs moyennes de MOE et MOR des PP issus d'OSB-PF ont été supérieures à celles du PP classé M-3i conformément à la norme ANSI 208.1. Les valeurs moyennes issues des essais de cohésion interne des PP fabriqués ont été inférieures aux valeurs normalisées, mais proches de la valeur moyenne (0,31 MPa) du PP classé M-0 [14]. Dans les Figure 19 et Figure 20 ci-dessous, l'abréviation « ref. » indique les panneaux de particules considérés comme comparables. Elle indique les différents grades industriels de panneaux de particules.

Tableau 9. Résultats des essais de flexion statique et cohésion interne des panneaux de particules (100 %) à partir d'OSB_PF

Composition	Valeurs calculées	MOR/MOE* densité (kg/m ³)	MOR* (MPa)	MOE* (MPa)	Cohésion Interne densité (kg/m ³)	Cohésion Interne (MPa)	Description de la fracture
12 % UF (face) 8 % UF (cœur) Particules provenant de panneaux OSB PF	Moyenne	789	15,8	3 383	766	0,28	centre
	Écart Type	26	1,9	299	16	0,07	
	Coefficient Variation	3	12	9	2	25	

* Module de rupture (MOR) et module d'élasticité (MOE)

Tableau 10. Résultats des essais de flexion statique et cohésion interne des panneaux de particules (100 %) à partir d'OSB_pMDI

Composition	Valeurs calculées	MOR/MOE* densité (kg/m ³)	MOR* (MPa)	MOE* (MPa)	Cohésion Interne densité (kg/m ³)	Cohésion Interne (MPa)	Description de la fracture
12 % UF (face) 8 % UF (cœur) Particules provenant de panneaux OSB pMDI	Moyenne	718	10,2	2 083	717	0,29	centre
	Écart Type	16	1,0	150	22	0,07	
	Coefficient Variation	2	10	7	3	25	

* Module de rupture (MOR) et module d'élasticité (MOE)

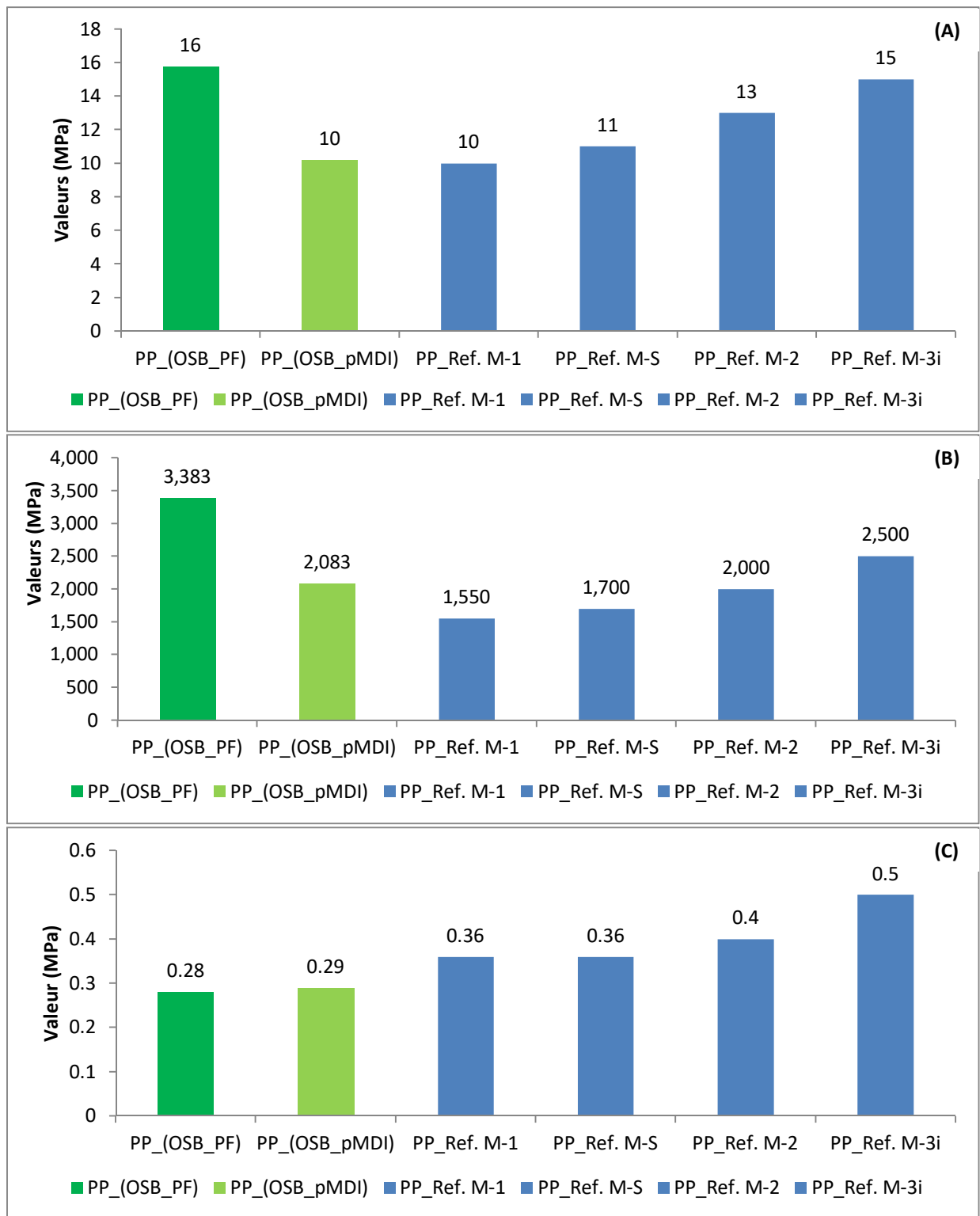


Figure 19. Comparaison des propriétés mécaniques des PP fabriqués en laboratoire versus normalisés ANSI 208.1-2009 : module de rupture (A), module d'élasticité (B), cohésion interne (C).

Pour pallier aux difficultés de fabrication des PP avec 100 % de fibres recyclées, le ratio 20 % recyclé et 80 % vierge a été considéré en vue de la fabrication des PP selon les paramètres standards de l'industrie. Les panneaux ainsi fabriqués (PP mixtes) ont été ensuite testés mécaniquement en vertu des mêmes normes ci-dessus énoncées. Les résultats obtenus sont présentés en deux groupes en fonction de l'adhésif utilisé dans la fabrication des panneaux OSB ayant servi de matière première.

Pour les PP mixtes _(OSB_pMDI), la valeur moyenne du MOE a été de 2 814 MPa et celle du MOR, de 14,2 MPa. Les essais de cohésion interne ont indiqué une valeur moyenne de 0,43 MPa avec une fracture au centre des échantillons (Tableau 11).

Pour les PP mixtes _(OSB_PF), la valeur moyenne du MOE a été de 2 983 MPa et celle du MOR, de 14,4 MPa. Les essais de cohésion interne ont révélé une valeur moyenne de 0,32 MPa avec une fracture au centre des échantillons (Tableau 12).

Les valeurs moyennes de MOE, MOR et cohésion interne obtenues en laboratoire ont été supérieures aux propriétés mécaniques du PP classé M-2 conformément à la norme ANSI 208.1 (Figure 19). Les PP mixtes _(OSB_PF) ont mieux performé au chapitre des MOR et MOE par rapport aux PP mixtes _(OSB_pMDI) en raison de la densité plus élevée. Par contre, le contraire s'est avéré pour les résultats de cohésion interne.

Tableau 11. Résultats des essais de flexion statique et cohésion interne des panneaux de particules mixtes (20 %-80 %) faits à partir d'OSB-pMDI et de fibres vierges

20 % Particules à base d'OSB enrésiné d'adhésif pMDI	MOR/MOE densité (kg/m ³)	MOR (MPa)	MOE (MPa)	Cohésion Interne densité (kg/m ³)	Cohésion Interne (MPa)
Moyenne	735	14,2	2814	722	0,43
Écart Type	21	1,4	217	10	0,11
Coefficient Variation	3	10	8	1	25

Tableau 12. Résultats des essais de flexion statique et cohésion interne des panneaux de particules mixtes (20 %-80 %) faits à partir d'OSB-PF et de fibres vierges

20 % Particules à base d'OSB enrésiné d'adhésif PF	MOR/MOE densité (kg/m ³)	MOR (MPa)	MOE (MPa)	Cohésion Interne densité (kg/m ³)	Cohésion Interne (MPa)
Moyenne	730	14,4	2983	715	0,32
Écart Type	16	1,4	171	14	0,06
Coefficient Variation	2	10	6	2	20

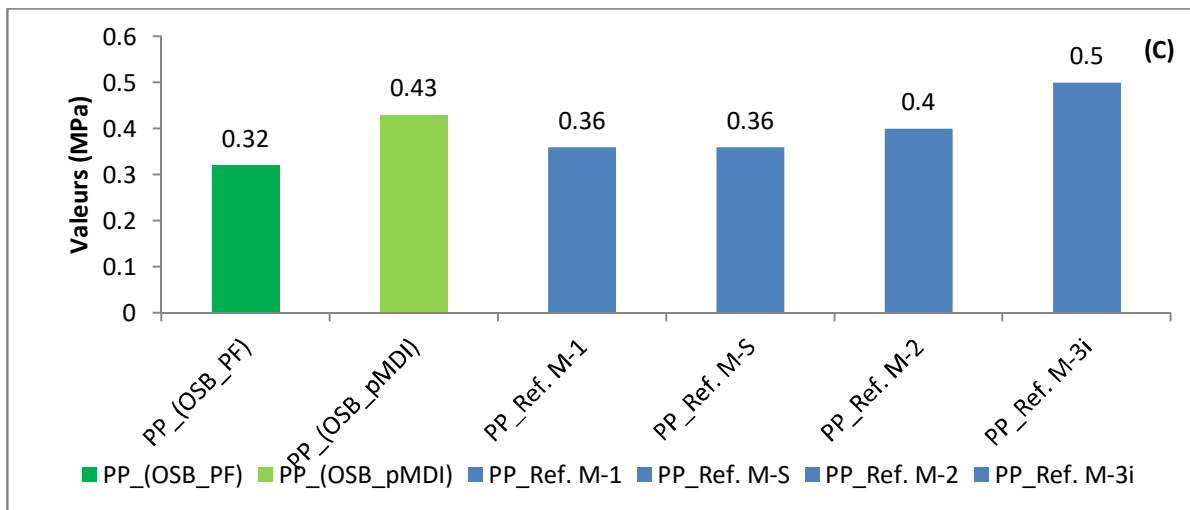
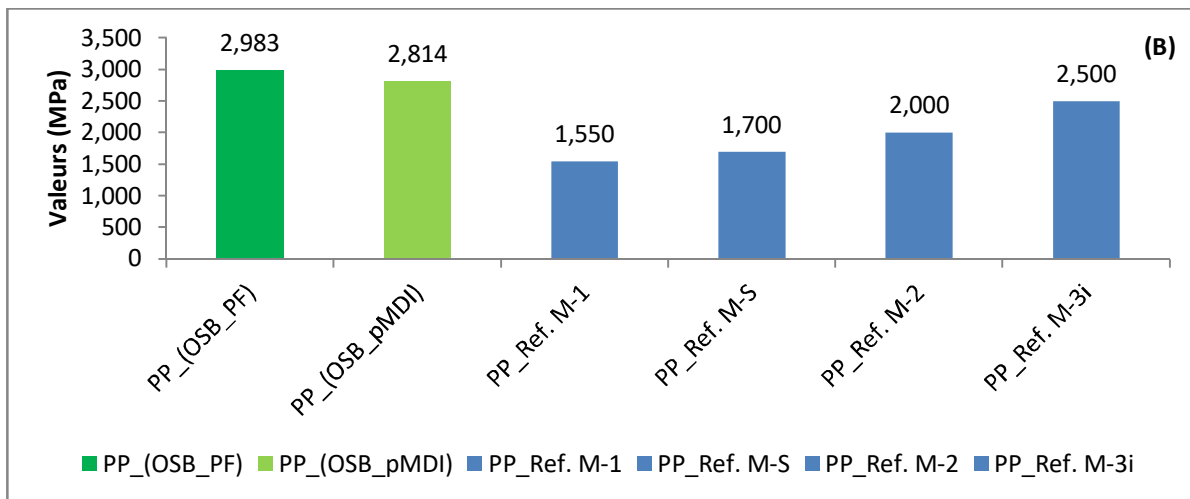
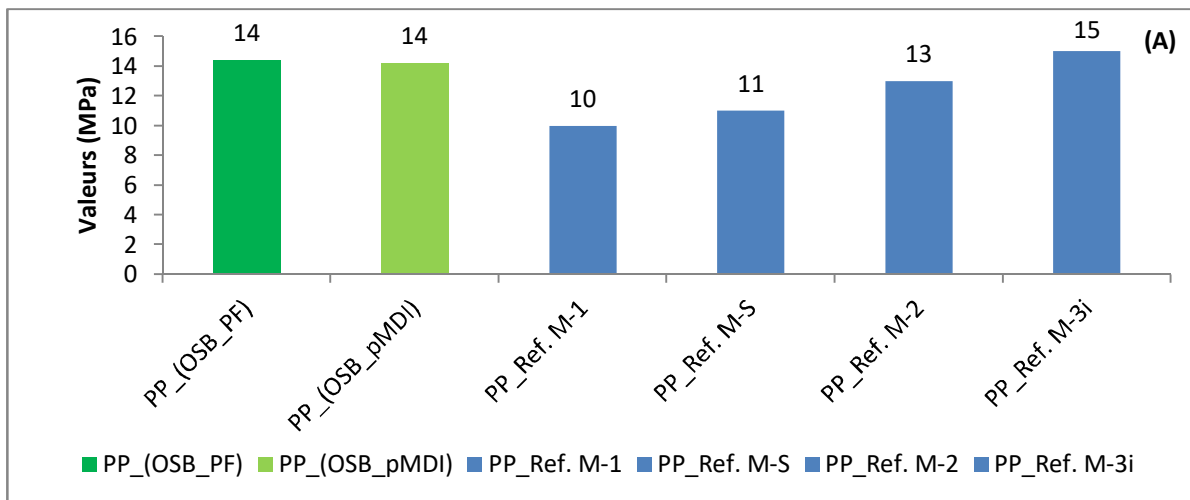


Figure 20. Comparaison des propriétés mécaniques des PP fabriqués en laboratoire versus normalisés ANSI 208.1-2009 : module de rupture (A), module d'élasticité (B), cohésion interne (C)

3.7 Caractérisation chimique et analyse des émissions

Cette section présente le sommaire de deux rapports disponibles en annexe 1 et 2. Le premier rapport (annexe 1) est basé sur la caractérisation chimique des échantillons tandis que le second rapport (annexe 2) relate de l'identification des polluants majeurs et leurs potentiels d'émission dans l'atmosphère en cas de combustion. Ces deux rapports sont rédigés en langue anglaise et ont été produits par CanmetÉNERGIE – Ottawa [15]

En raison de la masse très limitée des échantillons à caractériser et du besoin d'un dispositif de combustion de niveau laboratoire, la recherche et l'identification d'équipements permettant de réaliser les essais de combustion avec analyse des émissions n'ont pas été concluantes. CanmetÉNERGIE - Ottawa a été le seul laboratoire identifié pour effectuer ces essais. Son expertise de niveau national en matière de recherche dans le domaine de la bio-énergie a été mise à contribution dans cette étape du projet. De ce fait, elle a procédé à la caractérisation chimique des échantillons. Pour des raisons techniques de non-fonctionnement du dispositif de combustion à lit fluidisé, les essais de combustion n'ont pas été réalisés. Néanmoins, sur la base des données de caractérisation chimique, CanmetÉNERGIE a reçu le mandat d'identifier les polluants majeurs et de discuter de leurs potentielles émissions dans l'atmosphère en cas de combustion dans une centrale appropriée. Pour ce faire, CanmetÉNERGIE a comparé les résultats de caractérisation chimique des échantillons à ceux de la biomasse forestière disponibles dans la littérature scientifique afin d'identifier les polluants majeurs. Par la suite, le potentiel d'émissions dans l'atmosphère en cas de combustion dans une centrale appropriée des différents polluants majeurs a été discuté en référence aux bases de données internes et les données pertinentes de la littérature scientifique.

3.7.1 Caractérisation chimique des échantillons de bois

Dans le but de déterminer la composition chimique du bois de démolition et des produits fabriqués, des analyses chimiques ont donc été réalisées sur chacun des six échantillons suivants :

- Le bois de démolition tel que reçu du centre de tri;
- Le bois lamellé-collé fabriqué avec l'adhésif PRF;
- Les panneaux OSB encollés avec l'adhésif PF (OSB-PF);
- Les panneaux OSB encollés avec l'adhésif pMDI (OSB-pMDI);
- Les panneaux de particules fabriqués à partir d'OSB à base de colle PF;
- Les panneaux de particules fabriqués à partir d'OSB à base de colle pMDI.

Six kilogrammes de chaque échantillon, pour un total de 36 kg de matière, ont été envoyés dans les laboratoires de CanmetÉNERGIE pour caractérisation chimique. Le matériel à analyser a été broyé en particules de la taille des mailles d'un tamis d'environ 60 mailles au pouce carré. Par la suite, six analyses ont été effectuées sur chaque échantillon reçu, soit :

- Analyse des cendres (ASTM D4326) [16];
- Analyse thermogravimétrique (TGA en anglais) (ASTM D 7582) [17];
- Contenu en composés organiques volatils (COV) (ISO 562) [18];
- Pouvoir calorifique (ISO 1928) [19];
- Composition élémentaire chimique (ASTM D5373) [18];
- Contenu en halogène (protocole interne par d'hydro pyrolyse).

Pour chaque analyse, les éléments ou composantes chimiques à quantifier sont présentés dans le Tableau 13.

Tableau 13. Éléments ou composantes chimiques caractérisés

Analyses	Éléments /composés chimiques	Unité
Analyse des cendres	SiO ₂ ; Al ₂ O ₃ ; Fe ₂ O ₃ ; TiO ₂ ; P ₂ O ₅ ; CaO; MgO; SO ₃ ;	wt %
	Na ₂ O; K ₂ O	
	Baryum; Strontium; Vanadium; Nickel; Manganèse;	ppm
	Chrome; Cuivre; Zinc	
	Perte sur la fusion	wt %
Thermogravimétrique	Humidité; Cendres; Carbone fixé	wt %
COV	Volatile	wt %
Pouvoir calorifique	-	MJ/kg
Analyse élémentaire	Carbone (C); Hydrogène (H); Oxygène (O);	wt %
	Azote (N); Soufre (S)	
Halogènes	Chlore (Cl); Fluore (F); Brome (Br)	ug/g

Les résultats de la caractérisation chimique et la discussion des émissions potentielles des polluants majeurs identifiés sont présentés à la section ci-dessous.

3.7.2 Résultats et discussion

Cette section présente les résultats obtenus des différentes analyses chimiques réalisés sur les bois CRD et produits de bois fabriqués. Suite à la caractérisation chimique, les polluants majeurs sont identifiés et leurs émissions potentielles dans l'atmosphère en cas de combustion sont discutées par rapport aux données pertinentes de la littérature scientifique.

3.7.2.1 Caractérisation chimique

Les résultats de l'analyse des composés constitutifs des différents échantillons sont présentés dans le Tableau 1 de l'Annexe 1. Comparés à la biomasse forestière, les résultats obtenus des échantillons analysés ont été similaires, de manière générale, à ceux contenus de la biomasse vierge. Cependant, divers éléments chimiques tels que l'azote (N) et le soufre (S) sont davantage présents dans les échantillons des produits de la cascade. Dans le cas des échantillons de panneaux de particules, la présence de l'élément azote a dépassé les 3 % sur base anhydre de la fibre par rapport aux autres échantillons y compris la biomasse forestière dont le contenu est inférieur à 1 %. Cette différence de plus de 2 % s'explique essentiellement par le contenu en azote de différents adhésifs contenu dans la fibre utilisée pour la fabrication des panneaux de particules (adhésif pMDI). En effet, l'adhésif pMDI utilisé pour la fabrication des panneaux OSB présente deux atomes d'azote comme le montre la formule chimique de son unité répétitive [C₁₅H₁₀N₂O₂]_n. De plus l'adhésif Urée Formaldéhyde (UF) utilisé pour la fabrication des panneaux de particules contient aussi deux atomes d'azote comme le présente la structure chimique de l'unité répétitive constitutive [(O)CNHCH₂NH]_n de l'adhésif UF.

Le contenu (%) en cendres des échantillons analysés a été similaire à celui issu des produits à base de biomasse forestière. Les composantes principales des cendres ont été le calcium, le sodium et le potassium, avec une quantité importante de silicium, de fer et de magnésium. La présence de cuivre (Cu) s'est avérée élevée pour tous les échantillons, excepté dans le bois de démolition (Tableau 2, Annexe 1).

La détermination des halogènes a indiqué une présence de chlore (Cl) de 11 à 13 fois supérieure dans les échantillons de panneaux de particules par rapport au bois de CRD. Pour les échantillons de panneaux OSB et de lamellé-collé, les valeurs détectées ont été dans la norme si comparées au contenu en chlore du bois vierge (50-60 µg/g) ou de l'écorce (150-200 µg/g). Pour les halogènes fluor (F) et brome (Br), les quantités détectées ont aussi été dans la norme (< 10 µg/g) (Tableau 3, Annexe 1).

Au cours de la combustion, les émissions de différentes substances dans l'environnement ont des effets sur son équilibre. Les impacts sur l'environnement de ces substances sont caractérisés par un facteur d'impact qui est rattaché une substance spécifique. Par exemple, les impacts sur le changement climatique sont caractérisés par la substance dioxyde de carbone, mais les gaz à effet de serre (GES) comme l'oxyde nitreux et le méthane y contribuent aussi. Dans l'optique d'impacts sur l'environnement, les polluants majeurs pris en compte ont été le dioxyde de carbone (CO₂), le dioxyde de soufre (SO₂), l'oxyde nitrique (NO) et les cendres. Dans un contexte où les résidus sont brûlés aux fins énergétiques, les émissions suite à la combustion sont exprimées en facteur d'émission (FE). Le FE d'une substance est la masse des émissions normalisées par le contenu énergétique du combustible. Ces facteurs ont été calculés en supposant une conversion complète des précurseurs carbone (C), soufre (S) et azote (N) en oxydes appropriés. Parmi les échantillons analysés, seuls les panneaux de particules présentent un potentiel d'émission d'oxyde d'azote. Dans le cas des oxydes d'azote (NO_x), l'oxyde approprié est le dioxyde d'azote (NO₂). Les différents facteurs d'émission déterminés dans le cadre de la présente analyse sont présentés dans le Tableau 14 ci-dessous (pour plus de détails voir Tableau 4, Annexe 1).

Tableau 14. Facteurs d'émission des polluants majeurs identifiés

FE	unité	Bois CRD	BLC	OSB /PF	OSB /pMDI	PB(OSB/PF)	PB(OSB/pMDI)
CO ₂	kg/GJ	91.8	91.3	90.9	90.8	89.9	89.7
SO ₂	kg/GJ	0.098	0.079	0.068	0.076	<0.05	0.048
Ash	kg/GJ	0.289	0.231	0.451	0.209	0.497	0.236
NO _x	kg/GJ	0.274	0.258	0.653	0.796	5.828	5.310

3.7.2.2 Émissions potentielles des polluants majeurs dans l'atmosphère

Il s'avère que ces facteurs d'émission calculés sont des bonnes approximations des facteurs d'émission réels qui pourraient être observés à partir des expériences de combustion [21]. Le comportement des oxydes d'azote (NO_x) pendant la combustion est particulier car lorsque le combustible contient beaucoup d'azote, il se produit des réactions contradictoires en phase gazeuse. L'oxydation des espèces azotées forme l'oxyde d'azote (NO), tandis que ces mêmes espèces agissent pour réduire le NO en azote moléculaire. Ainsi, les émissions de NO_x observées sont nettement inférieures aux facteurs d'émission en supposant une conversion totale. Les facteurs d'émission de NO_x (Tableau 14) pour les échantillons de panneaux de particules fabriqués à partir de panneaux OSB recyclés sont élevés car ces derniers ont une teneur élevée en azote. Cependant, en pratique les émissions dans l'atmosphère d'oxyde d'azote seront plus faibles. Cette incohérence entre le FE calculé et les émissions réelles impose une expérimentation (combustion) pour déterminer de manière précise les émissions potentielles des oxydes d'azote dans l'atmosphère.

L'analyse a également démontré que des dioxines et des furannes peuvent se former dans les gaz de post-combustion de produits du bois en présence d'hydrocarbures, de chlore, d'oxygène et de cuivre en phase solide qui agit comme catalyseur. La combustion de panneaux de particules tout particulièrement génère les précurseurs nécessaires à la formation de dioxines et de furannes et ce, principalement à cause de la présence de quantités importantes de chlore et de cuivre par rapport aux autres produits testés dans ce projet. Cependant, dans la réalité, la formation de ces composés et leurs émissions dans l'atmosphère dépendent principalement des conditions de combustion et, en particulier, du traitement des gaz de post-combustion et du temps de séjour à la température comprise entre 180 °C et 500 °C. Une technique utilisée pour minimiser la formation de ces composés est le refroidissement rapide des gaz de post-combustion. Pour plus de détails, voir l'Annexe 2.

3.8 Conclusions faisabilité technique

L'étude de la faisabilité technique a fait ressortir des enjeux et des points positifs dans l'utilisation du bois de CRD dans la fabrication des produits de bois 100 % recyclés. Près de 58 % du bois reçu du centre de tri a dû être exclu du processus de recyclage en cascade suite à la caractérisation du matériel. Par contre, le bois de CRD s'est bien prêté au collage lors des essais de préqualification. Par ailleurs, sur un plan plus mécanique, la présence de résidus de métaux, tels que des clous et des vis, et d'autres résidus abrasifs du bois de CRD endommageait les outils de coupes des machines d'usinage. Dans une application industrielle, ces dommages pourraient être fortement réduits par l'inclusion d'un détecteur de métal dans la chaîne de tri pré-usinage. Toutefois, il faudrait considérer que ce procédé de pré-usinage affecterait le rendement en matière bois des résidus CRD.

L'utilisation du bois de CRD sélectionné pour la fabrication de bois lamellé-collé (BLC) et ensuite de panneaux OSB s'est révélée prometteuse. La performance en flexion des échantillons de BLC, bien qu'inférieure aux normes, pourrait être améliorée en sélectionnant en amont les planches sur la base de leurs propriétés mécaniques et en améliorant la qualité du jointage de bout de bois. Les performances mécaniques moyennes des panneaux OSB fabriqués selon les paramètres conventionnels de l'industrie étaient supérieures à celles acceptables par la norme de référence en vigueur. Les panneaux OSB sont normalement produits à partir du bois d'essences feuillues (principalement le tremble). L'utilisation de bois de résineux 100 % recyclé présente donc une opportunité d'affaires intéressante pour l'industrie de l'OSB.

La fabrication des panneaux de particules répondant aux exigences normatives a été difficile, en grande partie à cause des différents adhésifs présents dans la matière première provenant des produits fabriqués dans les étapes précédentes de la cascade. En effet, les mélanges d'adhésif (PRF + PF) et (PRF + pMDI) n'offre pas le milieu acide propice à la bonne réaction de l'adhésif UF utilisé pour la fabrication des PP. Pour remédier à ce problème, des ajustements au ratio adhésif, au ratio catalyseur et au temps de pressage ont toutefois permis d'obtenir à partir d'OSB-PF des panneaux de particules avec des propriétés de MOE et de MOR supérieures à celles des panneaux de particules de référence classés M-2. Ces améliorations ne se sont toutefois pas matérialisées pour les PP faits à partir d'OSB-pMDI dont les propriétés de MOE et de MOR sont demeurées inférieures par rapport à la même référence. La performance des panneaux PP issus d'OSB-PF est liée à leur densité, laquelle a été 5 % plus élevée que la densité moyenne de 720 kg/m³ des panneaux de référence et 9 % plus élevée que la densité moyenne de 691 kg/m³ des PP issus d'OSB-pMDI. La performance en cohésion interne des panneaux PP issus d'OSB-PF et des PP issus d'OSB-pMDI) a été en moyenne de 0,04 % à 0,07 % plus faible que la moyenne du PP classé M-0 (0,31MPa).

Le scénario défini pour résoudre les difficultés rencontrées lors de la fabrication des panneaux de particules avec 100 % de fibres recyclées a permis de fabriquer des panneaux de particules performants dans le respect des paramètres conventionnels. Les résultats obtenus des essais mécaniques indiquent des valeurs supérieures aux panneaux de particules de référence classés M-3i.

Finalement, la caractérisation chimique des échantillons de bois CRD et des produits de bois fabriqués a montré que le recyclage en cascade des produits de bois fabriqués avec 100 % de fibres recyclées génère des résidus utilisables à des fins énergétiques. Le niveau de contaminants contenus dans les produits recyclés comparativement à ceux contenus dans la biomasse forestière ou dans les bois de CRD est facilement contrôlable lors de combustion avec les technologies disponibles aujourd'hui. Il est donc envisageable d'utiliser l'ensemble des résidus et rejets de projets de recyclage de CRD en cascade pour la bioénergie tout en maintenant les émissions de polluants atmosphériques sous les seuils prescrits par la réglementation sur l'assainissement de l'atmosphère en vigueur au Québec en 2011 et mise à jour en janvier 2019 [22].

4. PARTIE II : ÉTUDE DE FAISABILITÉ ÉCONOMIQUE DE L'INCLUSION DE LA FIBRE RECYCLÉE DANS LES NOUVEAUX PRODUITS DE BOIS

Cette section du rapport présente le résumé de l'analyse économique du présent projet de recherche. Le rapport complet de cette analyse est présenté en annexe 3. Il est rédigé en langue anglaise.

4.1 Objectifs II

L'objectif de cette partie du projet était d'analyser la faisabilité économique de l'inclusion de fibres recyclées dans les processus de fabrication en cascade de nouveaux produits de bois.

4.2 Analyse économique

Le présent projet consistait à recycler la même fibre de bois à plusieurs reprises dans différents produits au cours de plusieurs cycles de construction / démolition. Le but a été de vérifier si une telle approche maximiserait la valeur de la fibre de bois et minimiserait l'élimination des déchets (incinération, enfouissement). Il s'avère que la qualité de la matière première est importante et influence les rendements en produits fabriqués. Dans cette partie du projet comme dans la partie 3, les rendements considérés sont ceux des industriels, car les rendements obtenus dans la partie I du projet ne sont pas basés sur une utilisation complète de la matière première, mais plutôt sur un nombre de produits à fabriquer. Les rendements analysés ont été de 68 % pour le bois lamellé-collé, de 70 % pour les panneaux OSB et de 88 % pour les panneaux de particules. La qualité et la quantité des résidus de bois issu de la CRD disponible ont permis de faire une analyse sur la base d'un ajout de fibres recyclées aux fibres vierges dans la fabrication de nouveaux produits de bois.

Tableau 15. Mélange de masses représentatives pour chaque utilisateur final

Utilisateur final	Tronc	Bois d'œuvre	Copeaux	Planures	Sciures	Écorces	Fines	Non bois	Total
Bois jointé ¹	-	100 %	-	-	-	-	-	-	100 %
BLC ²	-	100 %	-	-	-	-	-	-	100 %
OSB ³	100 %	-	-	-	-	-	-	-	100 %
Panneaux de particules ⁴	-	-	5 %	45 %	50 %	-	-	-	100 %
Cogénération ⁵	-	-	5 %	25 %	15 %	20 %	-	60 %	100 %

1 Jointage prépare et produit la matière première pour l'industrie du bois lamellé-collé à partir du bois de CRD.

2 BLC fait référence à l'industrie du lamellé-collé.

3 OSB fait référence à l'industrie des panneaux OSB.

4 Panneaux de particules fait référence à l'industrie des panneaux de particules.

5 Cogénération fait référence aux centrales de cogénération.

Par ailleurs, l'estimation du type et la qualité de la fibre de bois CRD que ces mêmes utilisateurs finaux pourraient acheter si elle était disponible sur le marché a été effectuée (Tableau 16). Le bois de CRD est classé par grade en fonction des contaminants qu'il contient. Le terme « contaminant » est utilisé dans son sens le plus large. Ainsi, toute substance autre que le bois constitue un contaminant [23]. Le grade 1 indique un matériau bois exclu de toute forme de contaminant ou contient moins de 1 % de contaminant. Le grade 2, bien qu'il ne soit pas normalisé, est un matériau qui se caractérise par un faible niveau de contaminants. Il constitue le plus important volume de bois issu de la CRD. Le grade 3 se caractérise par un fort niveau de contaminant et est généralement éliminé par incinération ou valorisation énergétique lorsque la technologie de combustion le permet [22].

Tableau 16. Utilisation en fonction du type et qualité de la fibre

Utilisateur final	Bois d'œuvre	Troncs	Grade 1	Grade 2	Grade 3	Total
Bois jointé	100 %	-	-	-	-	100 %
BLC	100 %	-	-	-	-	100 %
OSB	0 %	100 %	-	-	-	100 %
Panneaux de particules	-	-	20 %	80 %	-	100 %
Cogénération	-	-	-	60 %	40 %	100 %

Deux principaux facteurs sont à l'origine de la variation du coût de la fibre:

- le niveau de substitution de la fibre de bois non CRD par la fibre de bois CRD;
- le prix unitaire de la fibre.

Afin de simplifier l'analyse, le taux de substitution de 20 % de la fibre vierge par de la fibre recyclée dans la fabrication des matériaux traditionnels a été considéré. Les hypothèses de prix pour la fibre vierge versus la fibre de bois CRD ont été posées (Tableau 17).

Tableau 17. Prix unitaires considérés de fibres issues de différentes sources.

Fibres	Prix
Fibres CRD	
Grade 1	45 \$/tonne
Grade 2	10 \$/tonne
Grade 3	0 \$/tonne
Bois d'œuvre	101 \$/tonne
Autres bois solide	76 \$/tonne
Fibres vierges	
Bois de feuillus	45 \$/tonne
Bois d'œuvre	350 US\$/mfbm
Copeaux	80 \$/tonne
Planure	45 \$/tonne
Sciure	45 \$/tonne
Écorce	36 \$/tonne

Sur la base des données du Tableau 17 le remplacement de 20 % de fibres de bois de CRD à la quantité totale de fibre nécessaire à la fabrication de nouveaux produits a généralement réduit les coûts de matières premières. Cette conclusion n'est cependant pas la même pour tous les produits fabriqués par les utilisateurs finaux. La principale particularité concerne l'OSB, qui bénéficie d'une légère réduction du coût de la fibre. Réduction favorisée en partie par le fait que la fibre utilisée provient du bois lamellé-collé recyclé en remplacement des troncs de bois de feuillus. Les hypothèses de prix actuels ne donnent pas une valeur suffisamment basse aux bois recyclés pour stimuler de manière significative le remplacement des billes de bois feuillus. Sur la base des prix unitaires considérés de la fibre de bois (Tableau 17), le Tableau 18 présente les différentes marges possibles suite à l'intégration de 20 % de fibres recyclées dans la fabrication de nouveaux produits de bois ou en cogénération.

Tableau 18. Coûts de production à l'unité de différents produits de bois

Produits	Unités	Coûts fibres vierge	Coûts fibres mixte (vierge/CRD)	Écart	Marges
Panneaux de particules	Tonne/m ³	32,26 \$	28,15 \$	4,11 \$	-13 %
MDF	Tonne/m ³	32,26 \$	28,15 \$	4,11 \$	-13 %
Cogénération	Tonne/MWh	32,26 \$	26,76 \$	5,61 \$	-17 %
OSB	Tonne/msf	45,49 \$	44,04 \$	1,45 \$	-3 %
Bois jointé	Mfbm/mfbm	450,63 \$	381,28 \$	69,34 \$	-15 %
Lamellé-collé	Mfbm/m ³	354,38 \$	299,85 \$	54,53 \$	-15 %

Les résultats obtenus ont été confrontés aux coûts d'exploitation totaux de chaque utilisateur final. Pour ce faire, des règles empiriques approximatives ont été utilisées afin de qualifier la proportion des coûts d'exploitation que le bois représente généralement dans ces industries (Tableau 19).

Tableau 19. Coûts de la fibre de bois dans les coûts d'exploitation des industries

Produits	Coûts
Panneaux de particules	26 %
Cogénération	29 %
OSB	35 %
Bois jointé	85 %
Lamellé-collé	52 %

L'analyse des coûts d'exploitation effectuée indique que l'effet de la substitution de la fibre de bois CRD dans la composition fibreuse est plus important pour les producteurs de bois d'œuvre jointé et de bois lamellé-collé (Tableau 20). Cela est dû en grande partie à l'importance de la fibre de bois dans la structure globale des coûts d'exploitation de ces industries. Par ailleurs, l'effet d'une telle substitution est moindre pour les panneaux de particules et les panneaux OSB compte tenu de la capacité de la fibre de bois CRD à remplacer avec succès la fibre vierge pour la fabrication de ce type de produits. Les panneaux OSB sont les moins touchés en raison de la différence minimale de coûts entre la fibre vierge et la fibre recyclée. Toutefois, il faudrait prendre en compte une possible réduction de cette marge liée à la qualité de matière issue de la CRD, car la présence de détecteur de métal sur les lignes d'usinage n'exclut pas totalement le risque de dommages causés aux outils de coupe.

Tableau 20. Importance du coût de la fibre dans les coûts d'opération des différents producteurs de produits de bois

Produits	Coûts d'opération	Coûts fibres mixte	Coûts d'opération ajustés	Marges coûts d'opération
Panneaux de particules	124 \$	28 \$	120 \$	-3,3 %
Cogénération	112 \$	27 \$	106 \$	-5,0 %
OSB	130 \$	44 \$	129 \$	-1,1 %
Bois jointé	530 \$	381 \$	461 \$	-13,1 %
Lamellé-collé	681 \$	300 \$	627 \$	-8,0 %

4.3 Conclusions faisabilité économique

La présente étude économique a montré que la substitution de la fibre vierge par la fibre de bois CRD dans ces industries pourrait générer des économies, compte tenu des prix ainsi que des hypothèses de distances de transport raisonnables considérées dans cette analyse. Cependant, il reste que la fibre de bois CRD est une matière première de faible valeur et à forts volumes, sujette à de nombreux facteurs indépendants des principaux participants du marché. En particulier, les coûts de transport et du carburant, ainsi que les fluctuations dans la disponibilité des copeaux de bois de scierie peuvent rapidement influencer, voire éliminer l'avantage concurrentiel de la fibre CRD.

5. PARTIE III: ANALYSE DE CYCLE DE VIE (ACV) DES DIFFÉRENTS PRODUITS DE LA CASCADE

5.1 L'analyse du cycle de vie

L'analyse de cycle de vie environnemental est un outil d'évaluation de la durabilité en ce sens qu'elle permet d'évaluer les impacts environnementaux potentiels des produits, services et décisions. Elle permet ainsi de comprendre, de quantifier et d'interpréter les flux d'énergie et de matière ainsi que les émissions dans un système défini. Elle offre également la possibilité d'identifier des pistes de réduction des impacts environnementaux. Dans cette étude, l'ACV est réalisée en conformité avec la série de normes ISO14040/44 (2006) [24, 25]. Elles décrivent le cadre et les lignes directrices pour mener à bien une étude d'analyse de cycle. En référence à la norme ISO 14040, la réalisation d'une ACV se subdivise en 4 principales étapes, à savoir: 1) objectifs et champs d'étude, 2) inventaire du cycle de vie (LCI), 3) évaluation de l'impact du cycle de vie (LCIA) et 4) interprétation (Figure 21) [24].

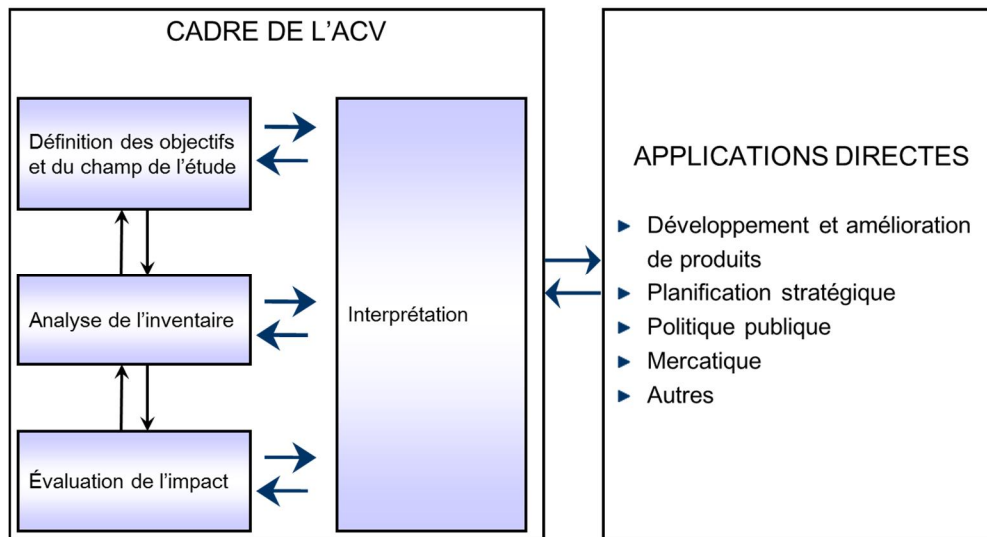


Figure 21. Les étapes de l'ACV [24]

En analyse de cycle de vie, Il existe deux types d'approches :

- ACV Attributionnelle (ACV-A);
- ACV Conséquentielle (ACV-C).

De manière simplifiée la différence entre les deux approches réside dans le fait que l'ACV-A alloue une responsabilité environnementale au cycle de vie d'un produit ou service étudié tandis que l'ACV-C, complémentaire à l'approche attributionnelle, se focalise sur les conséquences environnementales potentielles causées par un changement survenant dans le cycle de vie d'un produit suite à une décision prise. En effet, dans une ACV-A tous les processus sont reliés entre eux par des flux de matière ou d'énergie, tandis qu'en ACV-C, les processus peuvent également être unis par des liens de causalité.

5.2 Objectifs

En général, l'objectif de cette analyse de cycle de vie a été d'évaluer l'empreinte carbone des différents produits de bois issus du processus de recyclage en cascade. De manière spécifique, le premier objectif a été d'évaluer et de comparer l'empreinte carbone des produits fabriqués à partir de la fibre recyclée à celui des mêmes produits fabriqués à partir de la fibre vierge. Le but de cette comparaison a été de mettre en relief les performances environnementales des différents produits ainsi que d'identifier les plus importants contributeurs (étapes de cycle de vie) qui impactent sur leurs performances. Pour atteindre ce premier objectif, une analyse de cycle de vie de type attributionnelle a été préconisée. Le deuxième objectif quant à lui a été d'évaluer la conséquence environnementale du recyclage en cascade de la fibre CRD en substitution de la fibre vierge dans le processus de fabrication de produits de bois à partir de la fibre vierge. Le but de ce second objectif a été de mettre en relief les conséquences environnementales de telle décision ainsi que l'importance environnementale du recyclage multiple de la fibre CRD. Dans ce cas, l'approche conséquentielle via une analyse de cycle de vie conséquentielle a été préconisée. L'approche d'évaluation de l'empreinte carbone des produits est encadrée par la norme ISO 14067-2018 [25]. De ce fait, la présente évaluation a été réalisée en conformité à ladite norme.

5.3 Hypothèses

Au regard des objectifs ci-dessus présentés, deux hypothèses ont été posées dans la présente analyse de cycle de vie. Les deux hypothèses se rapportent à la performance environnementale et à l'empreinte carbone des produits. En effet, la première hypothèse stipule que le cycle de vie des produits de bois fabriqués à partir de la fibre 100 % recyclée présente une meilleure performance environnementale et une faible empreinte carbone comparativement aux mêmes produits fabriqués à partir de la fibre 100 % vierge. La seconde hypothèse quant à elle stipule que le recyclage multiple de la fibre CRD avec effet substitution fibres vierges, présente une meilleure performance environnementale et une faible empreinte carbone comparativement aux mêmes produits fabriqués à partir de la fibre 100 % vierge.

5.4 Raisons de l'étude

Quatre raisons constituent le socle de cette étude. La première raison de cette étude est liée au nouveau besoin de gestion de matières résiduelles issues de la construction, rénovation et démolition des bâtiments. En effet, le gouvernement de Québec tel que prévu dans le Plan d'action 2011-2015 de la Politique québécoise de gestion des matières résiduelles a commencé l'application du bannissement du bois des sites d'enfouissement ou d'incinération. À ce propos, il a été envisagé d'appliquer un bannissement progressif en fonction des différents types de résidus de bois. Les résidus de bois les plus propres par exemple le bois vierge constituent le premier type de bois à être bannis de l'élimination [1]. La deuxième raison d'être de cette étude se rattache à la production de valeur ajoutée à partir des résidus de bois. La troisième raison quant à elle est reliée à l'utilisation maximale de la fibre de bois avant son insertion comme combustible dans les processus de valorisation énergétique. La quatrième raison est liée au programme de développement des connaissances sur les matériaux à faible empreinte carbone promue par le gouvernement du Québec dans la sous-action 19.4.3 du Plan d'Action sur les Changements Climatiques (PACC 2013-2020). Sur cette base, il est pertinent de déterminer la faisabilité technique et économique de cette valorisation ainsi que d'évaluer par analyse de cycle de vie l'empreinte en carbone des produits de bois fabriqués avec 100 % de fibres recyclées en comparaison des mêmes produits fabriqués avec 100 % de fibres vierges.

5.5 Importance et pertinence

Développer des connaissances dans la gestion des résidus de bois de CRD concorde avec la vision de FPInnovations d'être à l'affût des tendances et opportunités règlementaires. La présente analyse s'inscrit en toute cohérence avec la Politique québécoise de gestion des matières résiduelles du Gouvernement du Québec. Dans sa mission, FPInnovations réalise, collabore et supporte différents projets de valorisation de la matière résiduelle bois dans le but de créer de la valeur ajoutée et de développer de nouveaux marchés pour l'industrie forestière. La sensibilité des consommateurs sur les questions environnementales concourt avec les objectifs de l'industrie forestière et des centres de recherche en matière de gestion responsable des ressources naturelles.

Ce projet de recherche qui met ensemble les aspects techniques, économiques et environnementaux du recyclage en cascade du bois de CRD est une occasion exceptionnelle. En effet, le projet permet d'avoir un bon aperçu du potentiel que représente la ressource résidus CRD, si sa gestion est maximisée.

5.6 Auditoire visé

Tout comme les deux premières parties (I et II) du présent rapport, cette partie III a été présentée de façon à pouvoir être facile d'accès au grand public, car cet auditoire est constitué d'intervenants non techniques pouvant être des citoyens, élus municipaux, architectes, ingénieurs et autres.

5.7 Applications

Cette étude multi objectifs met à la disposition de l'industrie des produits de bois, des acteurs du secteur de la construction, de Recyc-Québec et des acteurs des centres de tri des informations pertinentes sur les bénéfices environnementaux potentiels que présente le recyclage des résidus bois de CRD. Elle contribuera également à la vulgarisation, auprès du grand public, de données environnementales sur le recyclage en cascade de cette ressource disponible et sous-exploitée.

5.8 Portée de l'étude

5.8.1 Fonctions et unités fonctionnelles

Dans une ACV, la définition de la fonction du système analysé est essentielle. Cependant, un système peut avoir plusieurs fonctions qui peuvent être principales et secondaires. Dans une étude d'ACV comparative de deux systèmes, il faut que les systèmes aient au moins une fonction principale commune, même si les fonctions secondaires et tertiaires diffèrent d'un système à un autre [26]. Dans cette étude, en raison de la variété de produits issus de la cascade, des leurs propriétés et usages visés, il est impossible de trouver une fonction commune du cycle de vie interne à la cascade. Cependant, dans la comparaison du produit fabriqué à partir de la fibre recyclée au produit identique, mais fabriqué à partir de la vierge, les deux produits remplissent parfaitement la même fonction principale qui leur est donc commune. De fait, les produits sont dits fonctionnellement équivalents, rendant possible la comparaison conformément aux normes ISO 14040/44 [24, 23].

Après la définition de la fonction commune des produits comparables, il est indispensable de définir l'unité fonctionnelle, car elle permet d'établir une base de comparaison appropriée entre les systèmes jugés fonctionnellement équivalents. De fait, l'unité fonctionnelle quantifie les fonctions identifiées des produits comparables. Le but principal étant de fournir une référence à laquelle les intrants et extrants sont en relation.

Dans cette étude d'ACV comparative, l'unité fonctionnelle de chaque produit est définie comme suit :

- Pour le bois lamellé-collé (BLC), la fonction est structurale et l'unité fonctionnelle est la quantité de matière nécessaire pour la production de 1 m³ de BLC utilisé dans le bâtiment pour une durée de 60 ans.
- Pour les panneaux à lamelles orientés (OSB en anglais), la fonction est de recouvrir une surface (mur, plancher ou toiture) dans le bâtiment. L'unité fonctionnelle est la quantité de matière nécessaire pour la production de 1 m³ de panneaux OSB utilisé dans le bâtiment pour une durée de vie de 60 ans.
- Les panneaux de particules (PP) sont majoritairement utilisés dans l'industrie du meuble. L'unité fonctionnelle est la quantité de matière nécessaire pour la production de 1 m³ de PP utilisé dans l'industrie du meuble pour une durée de vie de 50 ans.
- La biomasse peut être utilisée dans les centrales de cogénération pour la production d'énergie. L'unité fonctionnelle est l'utilisation de 1 m³ de biomasse pour produire une quantité d'énergie.

5.8.2 Frontières du système à l'étude

Les frontières du système définissent les processus à inclure ou exclure du système en étude. La définition des frontières est indispensable aux fins de la réalisation des inventaires. Conformément à la norme ISO 21930-2017 [27], les frontières du système étudié sont présentées dans la Figure 22. Le système présente différentes étapes de cycle de vie d'un produit. Ces étapes sont : la production, la construction, l'utilisation et la fin de vie. Dans le but de simplifier l'analyse, chaque étape du cycle de vie est subdivisée en modules d'informations identifiés par les lettres A, B, C, et D.

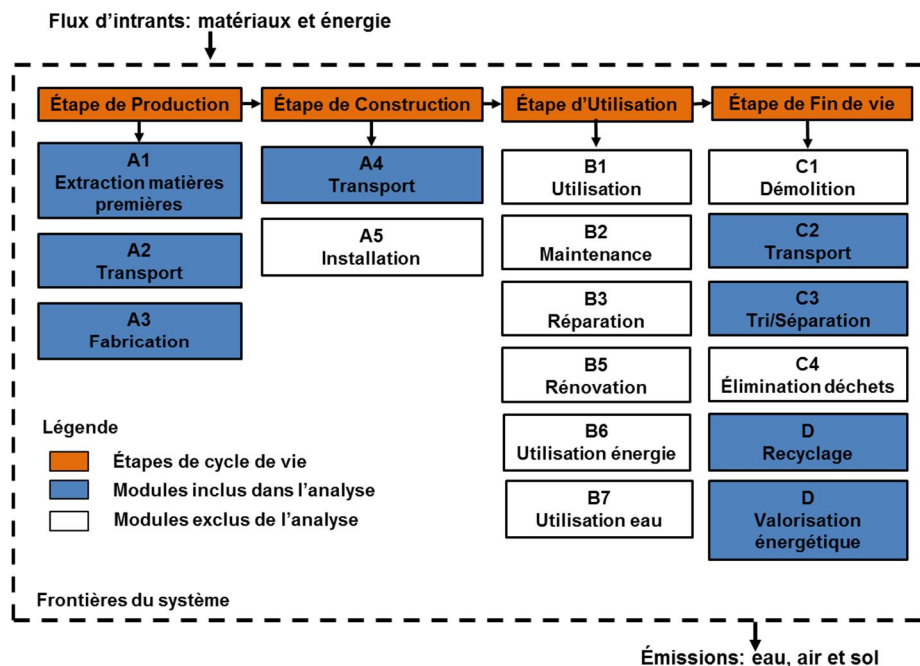


Figure 22. Frontières du système

Dans la présente ACV, l'étape de cycle de vie « utilisation » ainsi que les modules installation (A5), démolition (C1) et l'élimination des déchets (C4) ont été exclues des frontières du système puisqu'ils sont identiques pour les produits en comparaison. Pour les produits analysés, le focus a été mis uniquement sur les étapes de production et de fin de vie ainsi que sur le module transport (A4).

Les modules analysés de l'étape de production sont l'extraction de la ressource (A1), le transport du site d'extraction vers l'usine de fabrication (A2) et la fabrication proprement dite en usine (A3). Pour l'étape de fin de vie, le module démolition (C1) a été exclu de l'analyse en raison de l'égalité entre les produits comparés. Les modules analysés ont été le transport des résidus de démolition du site de démolition vers un centre de tri (C2), l'énergie de tri ou de séparation () et le D. Dans ce dernier, différents procédés de gestion de la matière résiduelle sont envisageables (la réutilisation, le recyclage et la valorisation énergétique). Aux fins de la présente étude, le procédé de recyclage a été analysé pour les produits issus de la fibre recyclée, tandis que le procédé de valorisation énergétique a été examiné dans le cas des produits fabriqués à partir de la fibre vierge. Après combustion, les déchets (cendres) ont été traités par enfouissement. L'utilisation de 1 m³ de bois CRD versus 1 m³ de bois vierge comme matière première intrant (input) dans une centrale de cogénération a aussi été analysée. À cet effet les frontières des systèmes analysés sont présentées à la Figure 26.

Pour chaque produit en comparaison (BLC, OSB PP et production énergétique), les détails des différents processus sont présentés aux Figure 23, Figure 24, Figure 25, Figure 26 respectivement. Cette analyse comparative permet de mettre en évidence les procédés de cycle de vie évités pour chaque produit analysé. Comme présenté dans les figures ci-dessous, chaque procédé dans le cycle de vie d'un produit fabriqué avec la fibre recyclée représente un procédé évité dans le cas du même produit fabriqué avec la fibre vierge et vice versa. Dans les diagrammes de frontière de système, les procédés inclus sont en jaune pour les produits à base de fibre recyclée, en vert pour les produits à base de fibre vierge. Les procédés évités sont en gris tandis que les procédés communs sont en blanc. En raison du fait que les procédés en blanc soient identiques, ils ont été exclus de l'analyse. L'expansion des frontières des systèmes analysés permet d'intégrer à l'étude de l'effet substitution marché. En d'autres termes, la substitution marché dans la présente étude est le remplacement partiel de la fibre vierge nécessaire à la fabrication d'un produit de bois par un ratio de fibres CRD pour la simple raison que la fibre CRD est recyclée en fin de vie. En effet, la fibre CRD recyclée, issue du produit bois lamellé-collé a été destinée à la substitution de la fibre vierge dans la fabrication du produit panneaux OSB. Cette substitution de fibres de bois survenait au niveau du produit suivant selon le schéma de recyclage en cascade.

De ce fait, les rendements de fabrication des différents produits sont présentés dans la Figure 27. Selon le schéma de la cascade, la fabrication du bois lamellé-collé à partir du bois issu du bois CRD présente un rendement de 68 %. Utilisé en construction pendant une durée de vie de 60 ans, la récupération est estimée à 90 % après démolition ou déconstruction et tri. Ces résidus vont ensuite à la fabrication des panneaux OSB, pour lesquels le rendement est de 63 %. Ce produit OSB est aussi utilisé dans le bâtiment pendant une durée de vie de 60 ans. Après démolition ou déconstruction, il est récupéré à 100 % et ajouté aux résidus issus des précédents procédés, pour la fabrication des panneaux de particules avec un rendement offert de 88 %.

Dans cette section du rapport, les rendements considérés en ACV sont différents de ceux indiqués dans la partie I du présent rapport. En effet les rendements obtenus lors de la fabrication des produits sont plus bas en raison du fait que la matière première (bois) n'avait été entièrement utilisée pour la fabrication des produits. Pour des raisons de temps et de budget, un nombre de produits à fabriquer avait été défini pour chaque produit de la cascade. Pour le bois lamellé-collé, 14 éléments avaient été fabriqués. Pour les panneaux OSB, 20 panneaux de chaque type d'adhésif (PF/pMDI) avaient été fabriqués tandis que dans le panneau de particules, 12 et 10 panneaux avaient été fabriqués respectivement à partir de la fibre de panneaux OSB encollée avec l'adhésif PF et pMDI. Dans la perspective d'ACV et d'analyse économique, ces rendements ont été redéfinis en considérant une utilisation quasi totale de la fibre à l'entrée du système de fabrication et en se basant principalement sur les rendements probables de chaque industrie [28, 25].

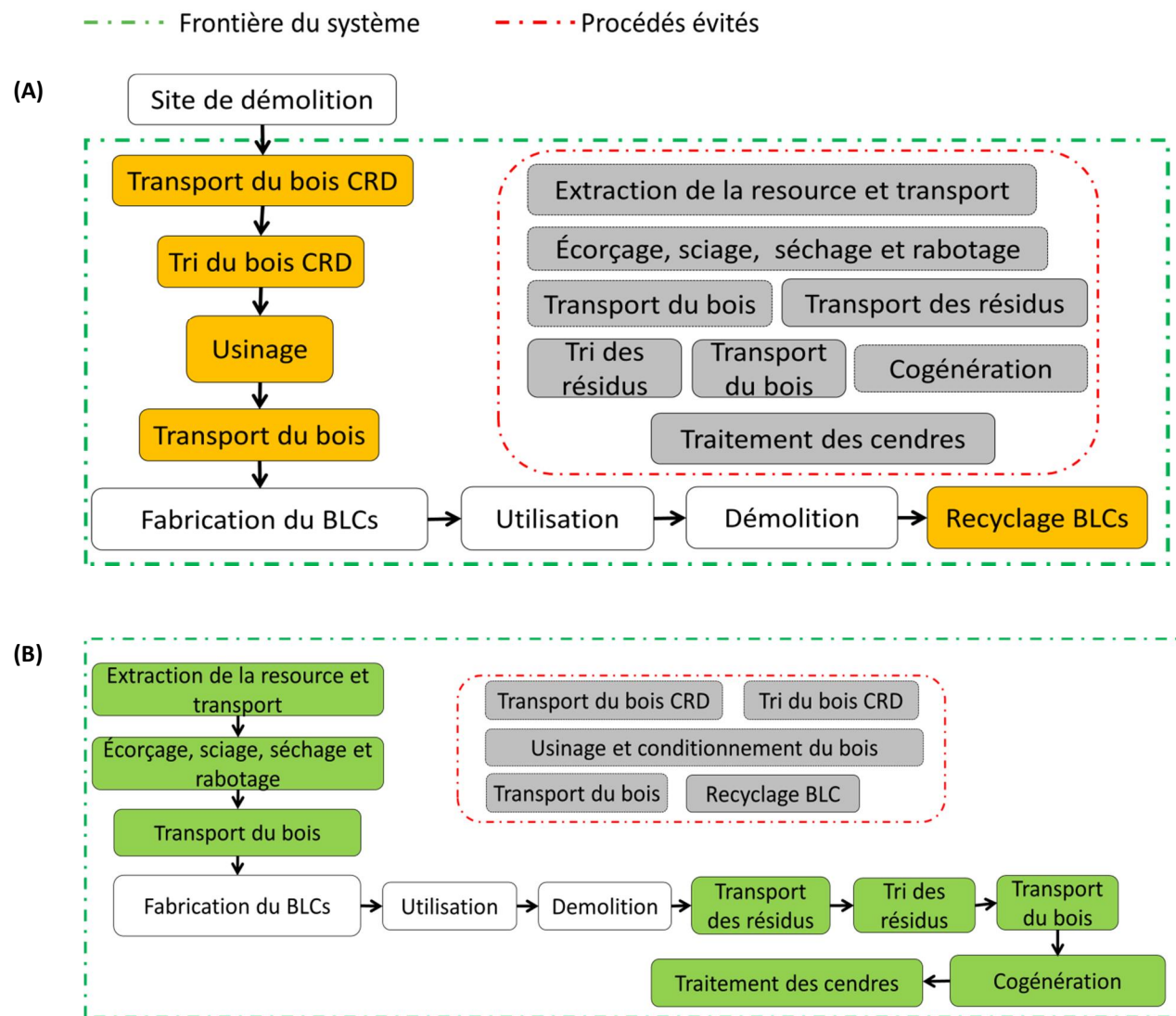


Figure 23. Frontière du système de production de bois lamellé-collé issu de la fibre recyclée (A) et de la fibre vierge (B).

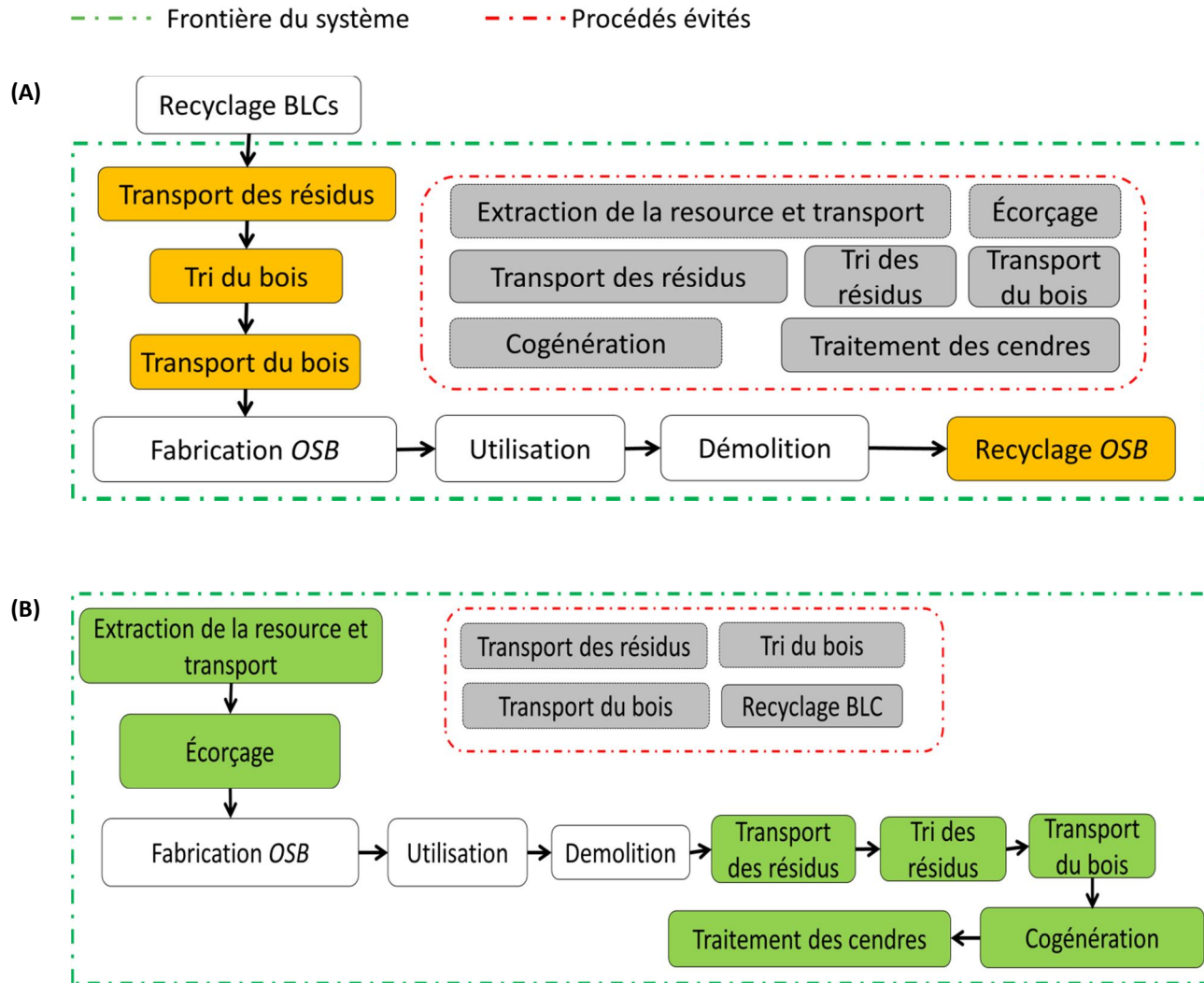


Figure 24. Frontière du système de production de panneaux à lamelles orientées issus de la fibre recyclée (A) et de la fibre vierge (B)

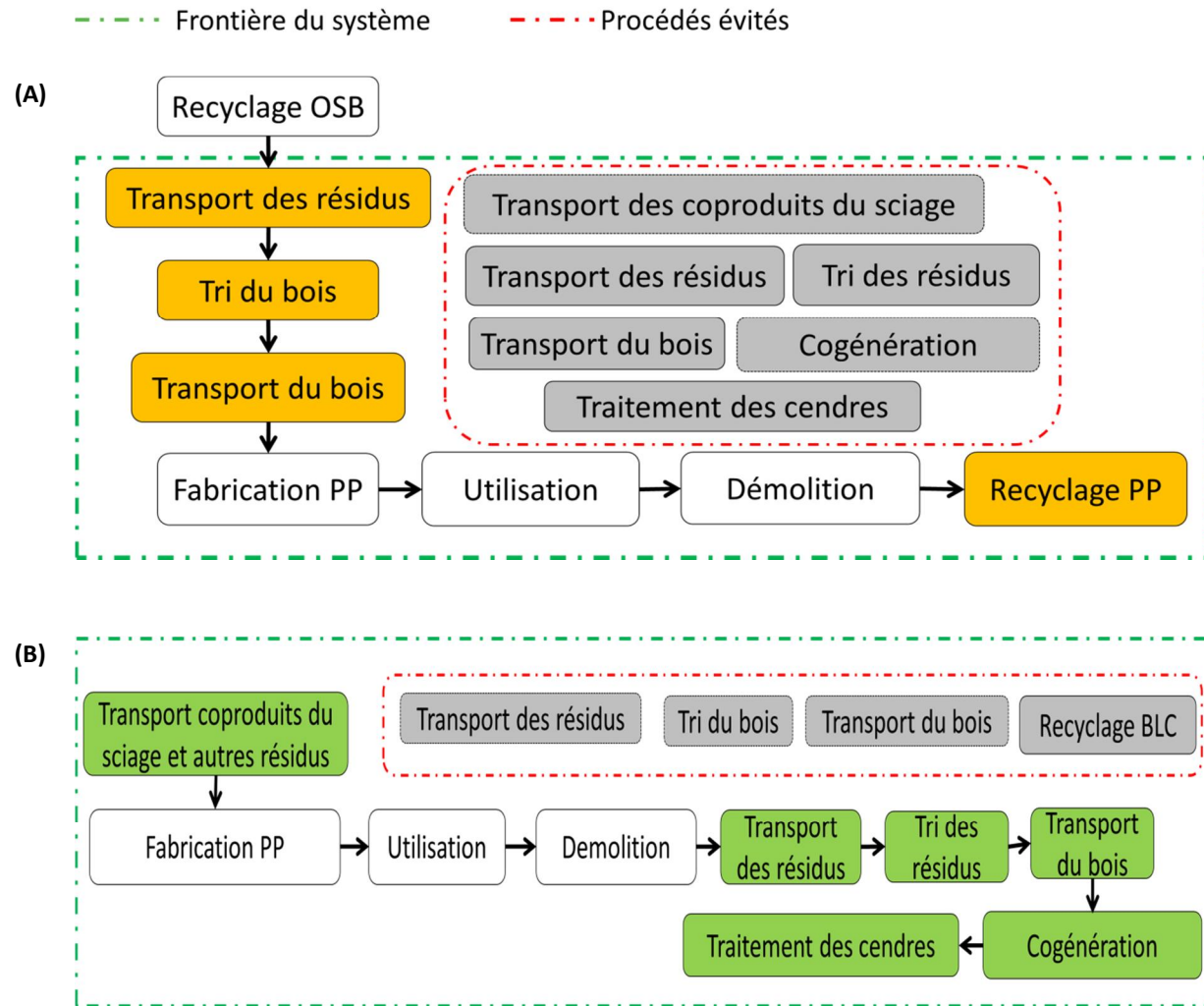


Figure 25. Frontière du système de production de panneaux de particules issus de la fibre recyclée (A) et de la fibre vierge (B)

--- Frontière du système - - - Procédés évités

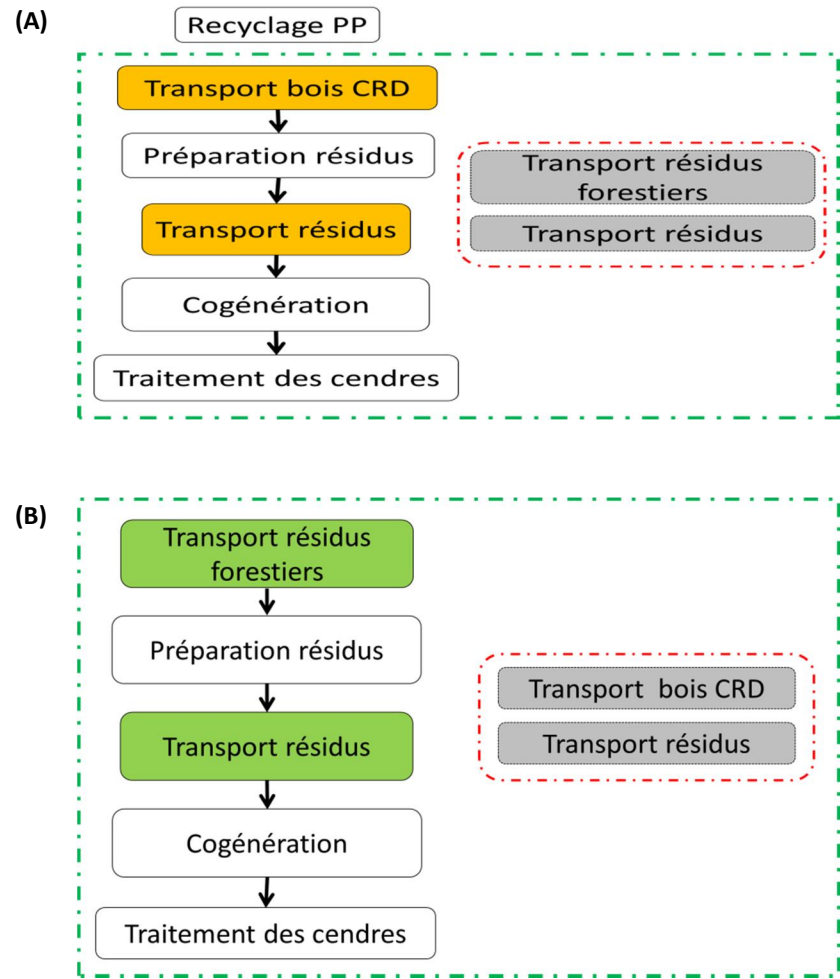


Figure 26. Frontière du système de production de chaleur à partir de la fibre recyclée (A) et de la fibre vierge (B)

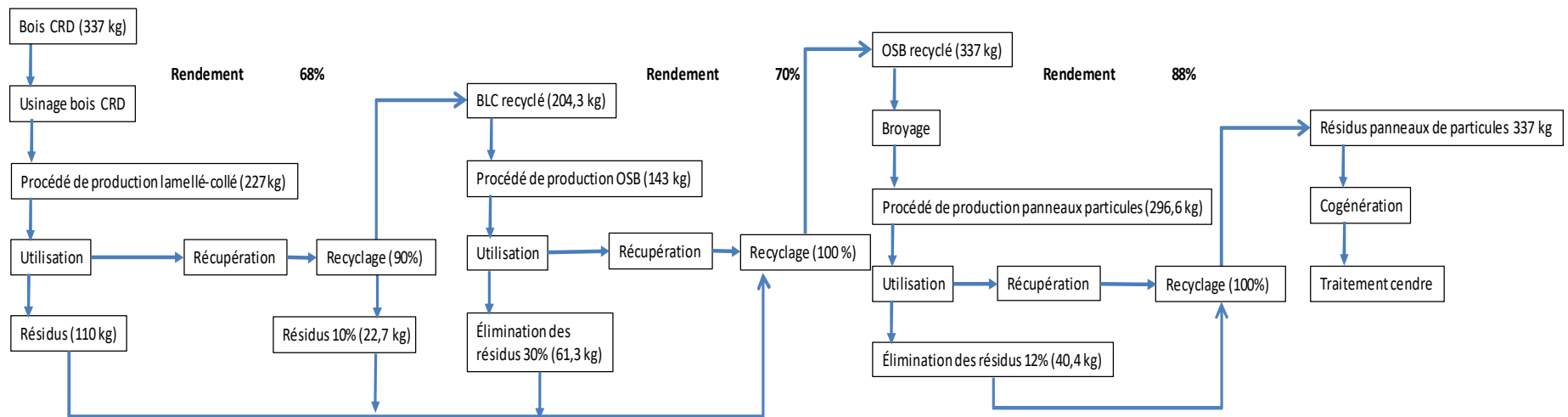


Figure 27. Flux de matière et rendements en produits du système cascade

5.9 Méthodologie

Dans la présente étude, en raison des types de produits fabriqués dans le processus en cascade et dans le but ultime d'analyser les conséquences environnementales du choix d'une production 100 % recyclée versus 100 % vierge, l'approche conséquentielle (ACV-C) a été retenue. L'ACV-C a été développée essentiellement pour étudier un changement jugé marginal survenant dans un cycle de vie. En absence de consensus méthodologique établi, la communauté scientifique s'accorde au moins sur le fait que le système étudié doit inclure les processus affectés par la décision prise [39, 40, 41, 42, 43, 44]. De fait, l'exclusion des processus non affectés par la décision présente l'avantage de réduire le travail nécessaire à la réalisation de l'analyse. Toutefois, cette exclusion empêche d'avoir une vue d'ensemble des impacts environnementaux du produit avant et après la prise de décision. À ce titre, elle n'offre pas la possibilité de savoir si les différences causées par la décision sont significatives ou pas. Dans cette étude de cas, les processus affectés et ceux non affectés par la décision prise ont été analysés, car cette approche permettait d'avoir une meilleure évaluation de l'ampleur des impacts de cette décision.

La méthodologie d'analyse a été développée en respect de la série de normes ISO 14040/44 (2006) pour l'ACV [24, 25] et de la norme ISO 14067-2012 pour l'empreinte carbone des produits [27]. Le logiciel de modélisation utilisé a été SimaPro v 8.4 [28]. La principale base de données utilisée est celle européenne Écoinvent 3. v 2.14. Cependant, les procédés sélectionnés pour la modélisation sont principalement des procédés développés pour le Québec ou pour le Canada. En absence de procédés qui reflètent le contexte québécois ou canadien dans la base de données Écoinvent, celle nord-américaine USLCI a été utilisée.

5.9.1 Qualité et sources de données

Différentes sources ou bases de données ont été utilisées. Il existe essentiellement deux types de données : les données primaires (ou données d'avant-plan) et les données secondaires (ou données d'arrière-plan).

Les données primaires sont des données spécifiques issues des procédés de fabrication en laboratoire. Elles ont été obtenues par analyse des bilans de matières (kg), des rendements (%) en produits finis et des échanges et communications avec les partenaires du projet. Elles ont été utilisées dans les étapes de cycle de vie production et transports. Lorsqu'il y avait absence de données primaires, des données secondaires ont été utilisées.

Les données secondaires ont été celles disponibles et accessibles à travers différentes bases de données spécialisées (comme ECOINVENT, ELDC, USLCI, Industry data) et la littérature scientifique, notamment celles fournies par Franklin & Associates [10, 11, 12]. Dans l'analyse de cycle de vie conséquentielle, les données marginales de substitution de la fibre vierge par la fibre recyclée ont été inventoriées.

5.9.2 Procédure d'allocation et fin de vie

La littérature scientifique démontre que le choix d'une procédure d'allocation a une influence significative sur les résultats [13, 14]. Dans le choix de la méthode d'allocation pour le recyclage, il a été important de s'assurer que celle-ci soit compatible tant avec les objectifs de la présente étude qu'avec la méthode d'analyse. Aucune allocation ne devrait être affectée compte tenu que l'ACV réalisée est l'ACV-C. L'expansion des frontières du système étant préconisée [15, 16].

En fin de vie, les modules analysés sont différents en fonction de la fibre utilisée dans la fabrication des produits. Dans le cas des produits fabriqués avec la fibre recyclée, le recyclage du matériau bois est effectué.

La méthode *cut-off* est appliquée au recyclage, car le fardeau environnemental de cette phase est attribué au produit qui utilisera cette matière recyclée. Dans le cas des produits fabriqués avec la fibre vierge, le scénario de fin envisagé est celui de la production énergétique via cogénération.

5.9.3 Incertitude et représentativité des résultats

De manière générale, dans une analyse de cycle de vie, les incertitudes sont liées aux données analysées et aux différents procédés (proxys) considérés dans le modèle. Les incertitudes liées aux données intrants et hypothèses posées dans une ACV-C sont plus importantes que dans une ACV-A en raison des sources d'incertitudes additionnelles liées aux analyses servant à identifier les processus affectés par une décision [17]. Pour les incertitudes associées aux données, une analyse de la qualité des données permet de clarifier les informations sur les données collectées et de réduire les incertitudes y associées. Une autre approche pour répondre à la question d'incertitude des données est celle de l'analyse de sensibilité. En effet, une analyse de sensibilité sur les données intrants a été réalisée. Elle a consisté à une sensibilité autour de l'ajout de 20 % de fibres recyclées dans la fibre vierge pour la fabrication des produits de bois.

Pour les incertitudes reliées au modèle, une solution a été proposée par les auteurs Humbert et al. en 2010 [34]. Ils ont défini quatre niveaux d'incertitude qui sont : très haut, haut, moyen et bas. Chaque catégorie d'impact est associée à un niveau d'incertitude auquel les auteurs associent le minimum de différence requis afin qu'un résultat dans une analyse comparative de cycle de vie soit significatif. Dans cette analyse, les seuils minimaux définis par Humbert et al. ont été considérés pour exprimer la valeur significative des résultats obtenus (Tableau 21).

Tableau 21. Écart minimal requis pour qu'une comparaison des scores d'impacts soit significative

Incertitudes liées à la modélisation d'impact			
Impacts 2002+	TRACI	Niveau d'incertitude	Écart minimal requis
Effets cancérogènes	Effets cancérogènes	Élevé	± 90 %
Effets non-cancéreux	Effets non-cancéreux	Élevé	± 90 %
Effets respiratoires (volatiles)		Faible	± 30 %
Effets respiratoires (particules)	Effets respiratoires	Moyen	± 50 %
Rayonnement ionisant	-	Élevé	± 80 %
Destruction de la couche d'ozone	App. de la couche d'ozone	Moyen	± 50 %
Écotoxicité aquatique	Écotoxicité	Élevé	± 90 %
Écotoxicité terrestre		Très élevé	± 90 %
Acide terrestre / nutriment	-	Élevé	± 80 %
Occupation de la terre	-	Élevé	± 80 %
Acidification aquatique	Acidification	Faible	± 30 %
Eutrophisation aquatique	Eutrophisation	Faible	± 30 %
Changement climatique	Réchauffement climatique	Faible	± 10 %
Énergie non renouvelable	Ép. des ressources fossiles	Faible	± 10 %
Extraction des minerais	-	Moyen	± 50 %

5.9.4 Méthode d'analyse d'impacts et catégories d'impacts analysées

La méthode d'analyse d'impacts retenue est la méthode TRACI 2. Cette méthode est adaptée au contexte nord-américain et elle est caractérisée par un niveau d'évaluation intermédiaire des catégories d'impacts [36]. En conformité aux règles de catégorie de produits (*PCR* en anglais) de FPIInnovations sur les produits bois version 2011, section 9.1, tableau 3, les catégories d'impacts analysés dans cette étude sont énoncées ci-dessous avec un accent mis sur la catégorie d'impacts « changements climatiques » [37] :

- Changements climatiques (exprimé en kg éq.CO₂);
- Destruction de la couche d'ozone (exprimé en kg éq.CFC-11);
- Smog photochimique (exprimé en kg éq.O₃);
- Acidification (exprimé en kg éq.SO₂);
- Eutrophisation (exprimé en kg éq. N).

5.9.5 Substitution marché/conséquence environnementale

Dans cette étude de cycle de vie des produits de bois, l'analyse des conséquences suite à la décision de recycler la fibre en vie en remplacement de l'utilisation de la fibre vierge a été analysée. L'expansion des frontières du système analysé pour chaque produit a permis de considérer cette conséquence du point de vue des impacts environnementaux. La substitution a été prise en compte seulement pour les produits recyclés. En effet, la quantité de matière de chaque produit à base de fibres CRD qui pourra être recyclée en fin de vie, substituera partiellement ou en totalité la quantité de fibre vierge nécessaire à la fabrication d'un nouveau produit de nature différente. À titre d'exemple, la quantité de bois de BLC recyclée en fin de vie pourra être utilisée pour la fabrication des panneaux OSB. Dans la première partie de ce projet de recherche, il a été démontré que les panneaux OSB fabriqués avec 100% de fibres CRD sont aussi performants que ceux fabriqués avec 100% de fibres vierges. Au regard de ces résultats, il est tout à fait possible de substituer en totalité ou en partie, la quantité de fibre vierge destinée à la fabrication des panneaux OSB par la fibre issue du recyclage des BLC en fin de vie. De fait, cette substitution permet de réduire en totalité ou en partie l'approvisionnement en fibres vierges avec un effet bénéfique sur le profil environnemental des produits de bois.

Ceci étant dit, dans le cas du produit bois lamellé-collé qui a été fabriqué avec la fibre CRD, le recyclage de 90 % de fibres en fin de vie, a permis d'éviter 63 % d'approvisionnement en fibres vierges pour la fabrication des panneaux *OSB*. Ensuite, pour le panneau OSB qui a été fabriqué avec la fibre CRD, le recyclage de 100 % de fibres en fin de vie, a permis d'éviter 88 % d'approvisionnement en fibres vierges pour la fabrication des panneaux *de* particules. En fin, pour le panneau de particules qui a été fabriqué avec la fibre CRD, le recyclage de 100 % de fibres en fin de vie, a permis d'éviter 100 % d'approvisionnement en fibres vierges pour alimenter la centrale de cogénération. Du point de vue modélisation, les crédits environnementaux liés aux processus d'approvisionnement en fibres vierges pour la fabrication des panneaux OSB sont considérés comme crédits évités dans le cas du recyclage du bois du lamellé collé fabriqué à partir de la fibre CRD. Cependant, le pourcentage de crédits évités est fonction des taux de rendement lors de la fabrication de chaque produit à partir de la fibre CRD.

5.9.6 Capture, séquestration et stockage du carbone biogénique

Pendant la photosynthèse, les arbres en croissance capturent le CO₂ de l'atmosphère, réduisant ainsi la quantité de CO₂ présente dans l'atmosphère. Ce carbone séquestré dans les arbres est ensuite stocké dans les produits de bois fabrique et ce pour la durée de leur vie.

L'analyse comparative des produits de bois remplissant la même fonction rend moins pertinente la quantification du carbone séquestré. En plus, l'expansion des frontières avec effet de substitution de marché ne permet pas de comptabiliser le carbone biogénique stocké dans les produits de bois, car ceci entraînerait un double comptage en faveur des produits fabriqués à partir de fibres recyclées.

5.10 Inventaire du cycle de vie (ICV)

Cette section présente les informations et les considérations retenues dans la réalisation de l'inventaire des flux de matière et énergie à l'intérieur des frontières du système. L'inventaire est présenté pour chaque produit fabriqué à partir de la fibre recyclée et son comparable fabriqué à partir de la fibre vierge.

5.10.1 Inventaire du produit bois lamellé-collé

L'inventaire de l'analyse de cycle de vie du berceau au tombeau (*Cradle to Grave*) de 1 m³ du produit bois lamellé-collé inclut plusieurs étapes. Celles-ci diffèrent selon le type de fibre (recyclée ou vierge) utilisée pour la fabrication des produits.

Dans le cas de l'utilisation de la fibre vierge, l'étape de cycle de vie production des matériaux (A1) inclut la production du bois, des résines et autres matériaux nécessaires à la fabrication du lamellé-collé. Pour la production du bois par exemple, les opérations de reboisement, de fertilisation et de gestion des forêts sont incluses dans le modèle. Les données utilisées sont des moyennes canadiennes. Il s'agit de données secondaires fournies par la base de données Écoinvent v3 et l'institut Athena [18].

L'étape de transport (A2) des produits extraits vers l'usine de fabrication du lamellé-collé comptabilise le transport par route (camions) ou/et par voie ferrée. Comme dans l'étape de production, les données utilisées sont des données secondaires. Il s'agit des moyennes canadiennes fournies par la base de données nord-américaine USLCI 2014 et l'institut Athena [38, 39].

L'étape de fabrication (A3) comptabilise les flux d'énergie, de matières et les déchets générés. Les énergies utilisées sont : électricité, diesel, gaz naturel, propane et chaleur produite sur le site via la combustion de la biomasse (résidus d'usinage). Dans les différents processus analysés, l'énergie électrique modélisée est de l'hydroélectricité produite au Québec. Le procédé de fabrication (*gate-to-gate*) modélisé est un procédé Écoinvent avec des données moyennes secondaires « Glued laminated timber, for indoor use {CA-QC} production | Alloc Def, U ».

L'étape de fin de vie inclut le transport du site de démolition vers le centre de tri, l'opération de tri, le transport du site de tri vers la centrale de cogénération et la cogénération. Les données utilisées sont des données primaires calculées au cas par cas sur la base de différents facteurs (site, usines de transformation, centrale de cogénération) considérés. Dans le cadre du présent projet, il a été établi que le bâtiment dans lequel le bois lamellé-collé fabriqué est mis en fonction se situait à une distance moyenne de 50 km du centre de tri (Multi récupération à Laval) considéré. Le processus de tri analysé était un proxy Écoinvent qui inclut le broyage du lamellé-collé. La distance de transport du centre de tri à la centrale de cogénération (Domtar Windsor) a été estimée à 172 km. Le Tableau 22 présente les données modélisées pour le cycle de vie de 1m³ de lamellé-collé fabriqué avec la fibre vierge.

Tableau 22. Inventaire de cycle de vie de 1 m³ de lamellé-collé fabriqué avec la fibre vierge

Intrants	Moyenne	Unité	Procédés utilisés dans Simapro	Justificatifs	Référence
Production (A1)					
Plantation et gestion durable	6,19E+02	kg	Spruce log with bark, reforested managed forest, prod. mix entry to saw mill, 44 % water content DES	Données moyennes d'inventaire de la production du lamellé-collé au Canada	Écoinvent 3
Potassium	2,47E+02	mg	Potassium fertiliser, as K ₂ O {CA-QC} treatment, sludge from pulp and paper production, landfarming Alloc Def, U	Apport moyen en fertilisant	Atena2013
Phosphore	2,47E+02	mg	Phosphate fertiliser, as P ₂ O ₅ {CA-QC} treatment, sludge from pulp and paper production, landfarming Alloc Def, U	Apport moyen en fertilisant	Atena2013
Azote	2,47E+02	mg	Nitrogen fertiliser, as N {CA-QC} treatment, sludge from pulp and paper production, landfarming Alloc Def, U	Apport moyen en fertilisant	Atena2013
Sciage	1,24E+00	m ³	Sawnwood, board, softwood, raw, dried (u=20 %) {CA-QC} board, softwood, raw, kiln drying to u=20 % Alloc Def, U	Données moyennes d'inventaire de la production du lamellé-collé au Canada	Écoinvent 3
Transport vers la scierie	1,57E+02	tkm	Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO6 {RER} transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO6 Alloc Def, U	Données moyennes d'inventaire distance d'approvisionnement des scieries au Canada	Atena2013
Résine phénolique	1,91E-01	kg	Phenolic resin {GLO} market for Alloc Def, U	Données moyennes d'inventaire de la production du lamellé-collé au Canada	Écoinvent 3
Bois raboté	5,59E-01	m ³	Sawnwood, board, softwood, dried (u=20 %), planed {CA-QC} planing, board, softwood, u=20 % Alloc Def, U	Données moyennes d'inventaire de la production du lamellé-collé au Canada	Écoinvent 3
Bois non raboté	6,80E-01	m ³	Sawnwood, board, softwood, raw, dried (u=20 %) {CA-QC} board, softwood, raw, kiln drying to u=20 % Alloc Def, U	Données moyennes d'inventaire de la production du lamellé-collé au Canada	Écoinvent 3
Polyuréthane	1,12E+01	kg	Polyurethane, rigid foam {GLO} market for Alloc Def, U	Données moyennes d'inventaire de la production du lamellé-collé au Canada	Écoinvent 3
Transport (A2)					
Bois d'œuvre/route	1,98E+02	tkm	Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO6 {RER} transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO6 Alloc Def, U	Données moyennes d'inventaire de la production du lamellé-collé au Canada	Athena, 2018
Bois d'œuvre/train	8,57E+00	tkm	Transport, freight train {US} diesel Alloc Def, U	Données moyennes d'inventaire de la production du lamellé-collé au Canada	Athena, 2018
Résine/route	1,07E+01	tkm	Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO6 {RER} transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO6 Alloc Def, U	Données moyennes d'inventaire de la production du lamellé-collé au Canada	Athena, 2018
Fin de vie (C et D)					
Transport des résidus	2,46E+01	tkm	Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO6 {RER} transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO6 Alloc Def, U_CRD	Donnée primaire	Google maps

Tri des résidus	4,83E+02	kg	Waste wood, post-consumer {RoW} treatment of, sorting and shredding Alloc Def, U	Données moyennes d'inventaire de la production des panneaux OSB au Canada	Écoinvent 3
Transport du bois	8,45E+01	tkm	Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO6 {RER} transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO6 Alloc Def, U	Donnée primaire	Google maps
Cogénération	1,79E+03	kWh	Electricity, high voltage {CA-QC} heat and power cogeneration, wood chips, 6667 kW, state-of-the-art 2014 Alloc Def, U_CRD	Données moyennes d'inventaire de la production des panneaux OSB au Canada	Écoinvent 3

Dans le cas de la fabrication de 1 m³ de lamellé-collé à partir de fibres recyclées, le contenu des différentes étapes de cycle de vie diffère de celui lié à la production à base de fibres vierges. Dans l'étape de production (A1), la production du bois a été exclue étant donné que cette matière première provenait des résidus de la CRD de bâtiments. En effet, les facteurs et considérations analysées en fin de vie dans le cas de l'utilisation de la fibre vierge sont ceux-là mêmes qui constituent la première étape dans le cas de l'utilisation de la fibre recyclée. Par ailleurs, il est important de noter que l'opération au centre de tri n'était qu'une simple opération de séparation des pièces de bois. L'estimation de l'énergie de tri est basée sur les données de consommation moyenne d'énergie électrique par tonne de résidus triés. Cette énergie est de 2 638 kWh/tonne de résidus. Le bois ainsi obtenu a ensuite été usiné pour exclure les clous et vis, puis raboté et ébouté afin d'être acheminé vers l'usine de fabrication du lamellé-collé. Les déchets d'usinage produits ont été utilisés sur le site pour la production de chaleur. L'usine de production du lamellé-collé était celle de Chantiers Chibougamau, laquelle est située à 697 km du centre de tri Multi récupération. En raison de cette importante distance, l'énergie de transport (tkm) de l'étape transport (A2) était supérieure si comparée à celle associée au procédé utilisant la fibre vierge. L'étape de fabrication (A3) a été identique à celle utilisée avec la fibre vierge. Les données d'inventaires sont présentées dans le Tableau 23.

Tableau 23. Inventaire de cycle de vie de 1 m³ de lamellé-collé fabriqué avec la fibre recyclée

Intrants	Moyenne	Unité	Procédé utilisé dans Simapro	Justificatifs	Référence
Production (A1)					
Usinage du bois	1,48	m ³	Sawnwood, board, softwood, dried (u=20 %), planed {CA-QC} planing, board, softwood, u=20 % Alloc Def, U	Données moyennes d'inventaire de la production du lamellé-collé au Canada	Écoinvent 3
Résine phénolique	0,19	kg	Phenolic resin {GLO} market for Alloc Def, U	Données moyennes d'inventaire de la production du lamellé-collé au Canada	Écoinvent 3
Bois raboté	0,56	m ³	Sawnwood, board, softwood, dried (u=20 %), planed {CA-QC} planing, board, softwood, u=20 % Alloc Def, U	Données moyennes d'inventaire de la production du lamellé-collé au Canada	Écoinvent 3
Lubrifiant	0,12	kg	Lubricating oil {GLO} market for Alloc Def, U	Données moyennes d'inventaire de la production du lamellé-collé au Canada	Écoinvent 3
Bois non raboté	0,68	m ³	Sawnwood, board, softwood, raw, dried (u=20 %) {CA-QC} board, softwood, raw, kiln drying to u=20 % Alloc Def, U	Données moyennes d'inventaire de la production du lamellé-collé au Canada	Écoinvent 3
Polyuréthane	11,17	kg	Polyurethane, rigid foam {GLO} market for Alloc Def, U	Données moyennes d'inventaire de la production du lamellé-collé au Canada	Écoinvent 3

Transport (A2)

Transport du bois CRD	36,37	tkm	Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO6 {RER} transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO6 Alloc Def, U	Données moyennes d'inventaire de la production du lamellé-collé au Canada	Athena, 2018
Transport du bois	507,03	tkm	Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO6 {RER} transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO6 Alloc Def, U	Données moyennes d'inventaire de la production du lamellé-collé au Canada	Athena, 2018
Résine/route	10,72	tkm	Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO6 {RER} transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO6 Alloc Def, U	Données moyennes d'inventaire de la production du lamellé-collé au Canada	Athena, 2018

5.10.2 Inventaire du panneau de lamelles orientées (OSB)

Comme dans le cas du produit lamellé-collé, l'inventaire du cycle de vie du berceau au tombeau (*Cradle to Grave*) de 1 m³ de panneaux à lamelles orientées (*OSB*) a été réalisé. Cet inventaire incluait les flux de matière et d'énergie de plusieurs étapes considérées (A, C et D). Ces étapes ont varié en fonction du type de fibres (recyclée ou vierge) utilisé pour la fabrication des panneaux *OSB*.

Dans le cas de l'utilisation de la fibre vierge, l'étape de cycle de vie production des matériaux (A1) est constituée de la production du bois, des résines et autres matériaux nécessaires à la fabrication des panneaux *OSB*. Pour la production du bois, les considérations sur les opérations de reforestation, fertilisation et gestion des forêts ont été identiques à celles considérées pour le bois lamellé-collé. Les données utilisées ont été des moyennes canadiennes. Elles sont des données secondaires fournies par la base de données Écoinvent v3 et l'institut Athena [18]

L'étape de transport (A2) des produits vers l'usine de fabrication des panneaux *OSB* a comptabilisé le transport par route (camions). Comme dans l'étape de production, les données utilisées sont des moyennes canadiennes. Il s'agit de données secondaires fournies par la base de données nord-américaine USLCI 2014 et l'institut Athena [18].

L'étape de fabrication (A3) a permis de comptabiliser les flux d'énergie et de matière, ainsi que les déchets générés. Les énergies utilisées ont été l'électricité, les huiles légères, le gaz naturel, le diesel et la chaleur produite sur le site via la combustion de la biomasse (résidus d'usinage). Dans les différents procédés (proxies) analysés, l'énergie électrique modélisée est de l'hydroélectricité produite au Québec, de moyen ou de haut voltage en fonction des procédés. Le procédé de fabrication (*gate-to-gate*) modélisé est un procédé (proxy) Écoinvent avec des données moyennes secondaires « Oriented strand board {CA-QC}| production | Alloc Def, U ».

L'étape de fin de vie a inclus les mêmes opérations que celles décrites dans le cas du produit lamellé-collé. Les distances d'approvisionnement ont été les mêmes, mais l'énergie de transport (tkm) était différente en raison de leur densité distincte (483 kg/m³ pour le lamellé-collé et 590 kg/m³ pour les panneaux *OSB*). Le Tableau 23 présente l'inventaire du cycle de vie de 1 m³ de panneaux *OSB* fabriqué avec la fibre vierge.

Tableau 23. Inventaire de cycle de vie de 1 m³ de panneaux OSB fabriqué avec la fibre vierge

Intrants	Moyenne	Unité	Procédé utilisé dans Simapro	Justificatifs	Référence
Production (A1)					
Ressources					
Plantation et gestion durable	1,15E+00	kg	Spruce log with bark, reforested managed forest, prod. mix entry to saw mill, 44 % water content DE S_CRD	Données moyennes d'inventaire de la production du lamellé-collé au Canada	Écoinvent 3
Potassium	2,47E+02	mg	Potassium fertiliser, as K ₂ O {CA-QC} treatment, sludge from pulp and paper production, landfarming Alloc Def, U_CRD	Apport moyen en fertilisant	Atena2013
Phosphore	2,47E+02	mg	Phosphate fertiliser, as P ₂ O ₅ {CA-QC} treatment, sludge from pulp and paper production, landfarming Alloc Def, U_CRD	Apport moyen en fertilisant	Atena2013
Azote	2,47E+02	mg	Nitrogen fertiliser, as N {CA-QC} treatment, sludge from pulp and paper production, landfarming Alloc Def, U-CRD	Apport moyen en fertilisant	Atena2013
Eau	7,91E-02	kg	Tap water {CA-QC} market for Alloc Def, U	Données moyennes d'inventaire de la production des panneaux OSB au Canada	Écoinvent 3
Résine phénolique	2,05E+01	kg	Phenolic resin {GLO} market for Alloc Def, U	Données moyennes d'inventaire de la production des panneaux OSB au Canada	Écoinvent 3
Bois	9,60E-01	m ³	Pulpwood, hardwood, measured as solid wood under bark {RoW} market for Alloc Def, U	Données moyennes d'inventaire de la production des panneaux OSB au Canada	Écoinvent 3
Paraffine	1,02E+01	kg	Paraffin {GLO} market for Alloc Def, U	Données moyennes d'inventaire de la production des panneaux OSB au Canada	Écoinvent 3
Lubrifiant	1,72E-01	kg	Lubricating oil {GLO} market for Alloc Def, U	Données moyennes d'inventaire de la production des panneaux OSB au Canada	Écoinvent 3
Transport (A2)					
Bois rond	7,37E+01	tkm	Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO6 {RER} transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO6 Alloc Def, U	Données moyennes d'inventaire de la production des panneaux OSB au Canada	Athena, 2018
Résine, paraffine et matériels auxiliaires	2,10E+01	tkm	Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO6 {RER} transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO6 Alloc Def, U	Données moyennes d'inventaire de la production des panneaux OSB au Canada	Athena, 2018
Fin de vie (C et D)					
Transport des résidus	3,05E+01	tkm	Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO6 {RER} transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO6 Alloc Def, U	Donnée primaire	Google maps
Tri des résidus	5,90E+02	kg	Waste wood, post-consumer {RoW} treatment of, sorting and shredding Alloc Def, U	Données moyennes d'inventaire de la production des panneaux OSB au Canada	Écoinvent 3

Transport du bois	1,05E+02	tkm	Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO6 {RER} transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO6 Alloc Def, U	Donnée primaire	Google maps
Cogénération	2,19E+03	kWh	Electricity, high voltage {CA-QC} heat and power cogeneration, wood chips, 6667 kW, state-of-the-art 2014 Alloc Def, U	Données moyennes d'inventaire de la production des panneaux OSB au Canada	Écoinvent 3

Dans le cas de l'utilisation de la fibre recyclée pour la fabrication de 1 m³ de panneau OSB, le contenu des différentes étapes de cycle de vie a différé de ceux produits à base de fibres vierges.

Dans l'étape de production (A1), les différents processus ont été essentiellement les mêmes que ceux décrits précédemment pour la production du lamellé-collé avec fibre recyclée. Une différence se situe au niveau de la distance entre le centre de tri (Multi récupération) et l'usine de fabrication des panneaux OSB (Produits forestiers Arbec) située à Shawinigan. Cette distance a été établie à 177 km, pour une énergie de transport de 122 tkm.

L'étape de transport (A2) était similaire à celle de l'OSB avec fibres vierges pour les adhésifs et auxiliaires de fabrication. En ce qui a trait au bois, l'énergie de transport était supérieure pour la production à base de fibres recyclées en raison de la distance entre le centre de tri et l'usine de production du panneau OSB et de la densité plus élevée (11 %) du produit lamellé-collé (483 kg/m³) par rapport à la fibre vierge utilisée pour l'OSB (450 kg/m³, peuplier faux-tremble). L'étape de fabrication (A3) était identique à celle considérée pour la production à base de fibre vierge. Les données d'inventaires pour l'OSB fabriqué avec la fibre recyclée sont présentées dans le Tableau 24.

Tableau 24. Inventaire de cycle de vie de 1 m³ de panneaux OSB fabriqué avec la fibre recyclée

Intrants	Moyenne	Unité	Procédé utilisé dans Simapro	Justificatifs	Référence
Production (A1)					
Ressources					
Eau	7,91E-02	kg	Tap water {CA-QC} market for Alloc Def, U	Données moyennes d'inventaire de la production des panneaux OSB au Canada	Écoinvent 3
Résine phénolique	2,05E+01	kg	Phenolic resin {GLO} market for Alloc Def, U	Données moyennes d'inventaire de la production des panneaux OSB au Canada	Écoinvent 3
Bois	9,60E-01	m ³	Pulpwood, hardwood, measured as solid wood under bark {RoW} market for Alloc Def, U	Données moyennes d'inventaire de la production des panneaux OSB au Canada	Écoinvent 3
Paraffine	1,02E+01	kg	Paraffin {GLO} market for Alloc Def, U	Données moyennes d'inventaire de la production des panneaux OSB au Canada	Écoinvent 3
Lubrifiant	1,72E-01	kg	Lubricating oil {GLO} market for Alloc Def, U	Données moyennes d'inventaire de la production des panneaux OSB au Canada	Écoinvent 3
Transport (A2)					
Résidus CRD et bois	1,57E+02	tkm	Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO6 {RER} transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO6 Alloc Def, U	Donnée primaire	Google maps

Résine, paraffine et matériels auxiliaires	2,10E+01	tkm	Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO6 {RER} transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO6 Alloc Def, U	Données moyennes d'inventaire de la production des panneaux <i>OSB</i> au Canada	Athena, 2018
Traitement des déchets					
Cendre	4,75E+00	kg	Wood ash mixture, pure {RoW} market for wood ash mixture, pure Alloc Def, U	Données moyennes d'inventaire de la production des panneaux <i>OSB</i> au Canada	Écoinvent 3
Déchet de bois	1,29E+01	kg	Waste wood, untreated {RoW} market for waste wood, untreated Alloc Def, U	Données moyennes d'inventaire de la production des panneaux <i>OSB</i> au Canada	Écoinvent 3

5.10.3 Inventaire du panneau de particules

L'inventaire de l'analyse de cycle de vie du berceau au tombeau (*Cradle to Grave*) de 1 m³ du produit panneaux de particules inclut plusieurs étapes. Celles-ci diffèrent en fonction du type de fibres (recyclée ou vierge) utilisée. Dans le cas de l'utilisation de la fibre vierge, les données des étapes de cycle de vie production des matériaux (A1), transport (A2) et fabrication (A3) sont extraites des travaux de l'institut Athena sur la production *Cradle to Gate* des panneaux de particules au Canada. Les données modélisées sont des moyennes canadiennes [19].

L'étape de fin de vie a inclus les mêmes opérations que celles décrites dans le cas du produit lamellé-collé à base de fibres vierges. La distance d'approvisionnement entre le site de démolition et le centre de tri était la même que celle indiquée dans l'étape de fin de vie des précédents produits fabriqués (lamellé-collé et panneaux *OSB*). Le centre de tri (Multi récupération) et la centrale de cogénération (Domtar Windsor) ont été les structures de références pour les opérations de tri/séparation et de production énergétique. Cependant, l'énergie de transport (tkm) était différente en raison de la densité des panneaux de particules (627 kg/m³) comparée à celles des précédents produits (590 kg/m³ pour l'*OSB* et 491 kg/m³ pour le BLC). Le Tableau 25 présente les données modélisées pour le cycle de vie de 1m³ de panneaux de particules fabriqués à partir de la fibre vierge.

Tableau 25. Inventaire de cycle de vie de 1 m³ de panneaux de particules fabriqués avec la fibre vierge

Intrants	Moyenne	Unité	Procédé utilisé dans Simapro	Justificatifs	Référence
Production (A1)					
Ressources					
Résine Urée formaldéhyde	6,55E+01	kg	Urea formaldehyde resin {GLO} market for Alloc Def, U	Données moyennes d'inventaire de la production des panneaux de particules au Canada	Athena, 2013
Résidus bois	5,58E+02	kg	Residual wood, dry {GLO} market for Alloc Def, U	Données moyennes d'inventaire de la production des panneaux de particules au Canada	Athena, 2013
Paraffine	1,70E+00	kg	Paraffin {GLO} market for Alloc Def, U	Données moyennes d'inventaire de la production des panneaux de particules au Canada	Athena, 2013
Bois rond	5,40E+01	kg	Pulpwood, softwood, measured as solid wood under bark {Europe without Switzerland} market for Alloc Def, U	Données moyennes d'inventaire de la production des panneaux de particules au Canada	Athena, 2013
Poussière générée	1,19E+01	kg	Saw dust, wet, measured as dry mass {CA-QC} suction, sawdust Alloc Def, U	Données moyennes d'inventaire de la production des panneaux de particules au Canada	Athena, 2013
Catalyseur	6,80E+00	kg		Données moyennes d'inventaire de la production des panneaux de particules au Canada	Athena, 2013
Scavenger	1,10E+00	kg		Données moyennes d'inventaire de la production des panneaux de particules au Canada	Athena, 2013
Huile hydraulique	7,90E-02	litre	Crude oil, at production/RNA	Données moyennes d'inventaire de la production des panneaux de particules au Canada	Athena, 2013
Huile de moteur	1,29E-01	litre	Crude oil, at production/RNA	Données moyennes d'inventaire de la production des panneaux de particules au Canada	Athena, 2013
Graisse	5,00E-03	kg	Crude oil, at production/RNA	Données moyennes d'inventaire de la production des panneaux de particules au Canada	Athena, 2013
Carton ondulé	8,90E-02	kg	Corrugated board box {CA-QC} production Alloc Def, U	Données moyennes d'inventaire de la production des panneaux de particules au Canada	Athena, 2013
Cerclage métallique	4,97E-01	kg	Cold rolled sheet, steel, at plant/RNA	Données moyennes d'inventaire de la production des panneaux de particules au Canada	Athena, 2013
Transport (A2)					
Bois rond	1,59E+01	tkm	Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO6 {RER} transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO6 Alloc Def, U	Données moyennes d'inventaire de la production des panneaux de particules au Canada	Athena, 2013
Résidus de bois	8,99E+01	tkm	Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO6 {RER} transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO6 Alloc Def, U	Données moyennes d'inventaire de la production des panneaux de particules au Canada	Athena, 2013
Résine	2,95E+01	tkm	Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO6 {RER} transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO6 Alloc Def, U	Données moyennes d'inventaire de la production des panneaux de particules au Canada	Athena, 2013
Paraffine	8,19E-01	tkm	Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO6 {RER} transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO6 Alloc Def, U	Données moyennes d'inventaire de la production des panneaux de particules au Canada	Athena, 2013

Catalyseur	3,06E+00	tkm	Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO6 {RER} transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO6 Alloc Def, U	Données moyennes d'inventaire de la production des panneaux de particules au Canada	Athena, 2013
Scavenger	4,96E-01	tkm	Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO6 {RER} transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO6 Alloc Def, U	Données moyennes d'inventaire de la production des panneaux de particules au Canada	Athena, 2013
Huiles et graisse	5,43E-02	tkm	Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO6 {RER} transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO6 Alloc Def, U	Données moyennes d'inventaire de la production des panneaux de particules au Canada	Athena, 2013
Carton ondulé	3,56E-02	tkm	Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO6 {RER} transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO6 Alloc Def, U	Données moyennes d'inventaire de la production des panneaux de particules au Canada	Athena, 2013
Biomasse	2,41E+01	tkm	Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO6 {RER} transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO6 Alloc Def, U	Données moyennes d'inventaire de la production des panneaux de particules au Canada	Athena, 2013
Cerclage métallique	2,80E-01	tkm	Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO6 {RER} transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO6 Alloc Def, U	Données moyennes d'inventaire de la production des panneaux de particules au Canada	Athena, 2013
Fin de vie (C et D)					
Transport des résidus	3,14E+01	tkm	Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO6 {RER} transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO6 Alloc Def, U	Donnée primaire	Google maps
Tri des résidus	6,27E+02	kg	Waste wood, post-consumer {RoW} treatment of, sorting and shredding Alloc Def, U	Données moyennes d'inventaire de la production des panneaux OSB au Canada	Écoinvent 3
Transport du bois	1,08E+02	tkm	Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO6 {RER} transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO6 Alloc Def, U	Donnée primaire	Google maps
Cogénération	2,22E+03	kWh	Electricity, high voltage {CA-QC} heat and power cogeneration, wood chips, 6667 kW, state-of-the-art 2014 Alloc Def, U	Données moyennes d'inventaire de la production des panneaux OSB au Canada	Écoinvent 3

Dans le cas de l'utilisation de la fibre recyclée pour la fabrication de 1 m³ de panneaux de particules, le contenu des différentes étapes de cycle de vie était différent de celui associé à la production à base de fibres vierges.

Dans l'étape de production (A1), les processus ont été essentiellement les mêmes que ceux décrits précédemment pour la fabrication des panneaux de particules à partir de la fibre vierge. La différence se situe au niveau de la distance entre le centre de tri (Multi récupération) et l'usine de fabrication des panneaux de particules (Uniboard) à Mont-Laurier. Cette distance a été établie à 215 km, pour une énergie de transport de 158 tkm.

L'étape de transport (A2) pour les adhésifs et auxiliaires nécessaires à la fabrication des panneaux était similaire à celle utilisée pour la production à base de fibres vierges. Au niveau du bois, l'énergie de transport était supérieure pour les panneaux à base de fibres vierges comparativement à ceux à base de fibres recyclées (405 tkm versus 229 tkm). Cependant, l'étape de fabrication (A3) était identique à celle utilisée pour la fabrication des panneaux à partir de la fibre vierge. Les données d'inventaires sont présentées au Tableau 26.

Tableau 26. Inventaire de cycle de vie de 1 m³ de panneau de particules fabriqué avec la fibre recyclée

Intrants	Moyenne	Unité	Procédé utilisé dans Simapro	Justificatifs	Référence
Production (A1)					
Ressources					
Résine Urée formaldéhyde	6,55E+01	kg	Urea formaldehyde resin {GLO} market for Alloc Def, U	Données moyennes d'inventaire de la production des panneaux de particules au Canada	Athena, 2013
Résidus bois	6,12E+02	kg	Residual wood, dry {GLO} market for Alloc Def, U	Données moyennes d'inventaire de la production des panneaux de particules au Canada	Athena, 2013
Paraffine	1,70E+00	kg	Paraffin {GLO} market for Alloc Def, U	Données moyennes d'inventaire de la production des panneaux de particules au Canada	Athena, 2013
Poussière généré	1,19E+01	kg	Saw dust, wet, measured as dry mass {CA-QC} suction, sawdust Alloc Def, U	Données moyennes d'inventaire de la production des panneaux de particules au Canada	Athena, 2013
Catalyseur	6,80E+00	kg		Données moyennes d'inventaire de la production des panneaux de particules au Canada	Athena, 2013
Scavenger	1,10E+00	kg		Données moyennes d'inventaire de la production des panneaux de particules au Canada	Athena, 2013
Huile hydraulique	7,90E-02	litre	Crude oil, at production/RNA	Données moyennes d'inventaire de la production des panneaux de particules au Canada	Athena, 2013
Huile de moteur	1,29E-01	litre	Crude oil, at production/RNA	Données moyennes d'inventaire de la production des panneaux de particules au Canada	Athena, 2013
Graisse	5,00E-03	kg	Crude oil, at production/RNA	Données moyennes d'inventaire de la production des panneaux de particules au Canada	Athena, 2013
Carton ondulé	8,90E-02	kg	Corrugated board box {CA-QC} production Alloc Def, U	Données moyennes d'inventaire de la production des panneaux de particules au Canada	Athena, 2013
Cerclage métallique	4,97E-01	kg	Cold rolled sheet, steel, at plant/RNA	Données moyennes d'inventaire de la production des panneaux de particules au Canada	Athena, 2013
Transport (A2)					
Transport des résidus	1,08E+02	tkm	Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO6 {RER} transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO6 Alloc Def, U	Donnée primaire	Google maps
Transport du bois	1,63E+02	tkm	Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO6 {RER} transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO6 Alloc Def, U	Donnée primaire	Google maps
Résine	2,95E+01	tkm	Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO6 {RER} transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO6 Alloc Def, U	Données moyennes d'inventaire de la production des panneaux de particules au Canada	Athena, 2013
Paraffine	8,19E-01	tkm	Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO6 {RER} transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO6 Alloc Def, U	Données moyennes d'inventaire de la production des panneaux de particules au Canada	Athena, 2013

Catalyseur	3,06E+00	tkm	Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO6 {RER} transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO6 Alloc Def, U	Données moyennes d'inventaire de la production des panneaux de particules au Canada	Athena, 2013
Scavenger	4,96E-01	tkm	Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO6 {RER} transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO6 Alloc Def, U	Données moyennes d'inventaire de la production des panneaux de particules au Canada	Athena, 2013
Huiles et graisse	5,43E-02	tkm	Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO6 {RER} transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO6 Alloc Def, U	Données moyennes d'inventaire de la production des panneaux de particules au Canada	Athena, 2013
Carton ondulé	3,56E-02	tkm	Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO6 {RER} transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO6 Alloc Def, U	Données moyennes d'inventaire de la production des panneaux de particules au Canada	Athena, 2013
Biomasse	2,41E+01	tkm	Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO6 {RER} transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO6 Alloc Def, U	Données moyennes d'inventaire de la production des panneaux de particules au Canada	Athena, 2013
Cerclage métallique	2,80E-01	tkm	Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO6 {RER} transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO6 Alloc Def, U	Données moyennes d'inventaire de la production des panneaux de particules au Canada	Athena, 2013

5.10.4 Inventaire de la valorisation énergétique

Les procédés de valorisation énergétique considérés dans le cadre de la présente étude ont été des procédés de cogénération. La cogénération est un système qui permet de produire en simultanément de l'énergie mécanique et de l'énergie thermique en brûlant un combustible. De ce fait, la technologie du système de cogénération est fonction du combustible brûlé. Les combustibles peuvent être des produits fossiles (gaz naturel, charbon, mazout), de la biomasse ou des produits de récupération (biogaz, ordures ménagères, déchets industriels) [20]. Au Québec, la biomasse forestière est une ressource à valeur ajoutée présente, mais pas toujours accessible. En effet, les distances d'approvisionnement et le coût de la matière ne sont pas toujours favorables à la récupération de cette biomasse. C'est d'ailleurs ce qui explique que les centrales de cogénération s'alimentent de matière première mixte (résidus de scieries, résidus d'usines de pâte et papiers, produits de centres de tri environnants).

Pour la présente étude, la centrale de cogénération utilisée était celle de Domtar à Windsor. Cette installation est alimentée de biomasse forestière, de résidus CRD, de bio-solides et de bio-produits [20]. La considération d'une alimentation à 100 % issue de biomasse forestière comparée à celle à 100 % en biomasse post-consommation a été effectuée et analysée. Dans cette analyse comparative, le processus de cogénération était le même alors que les distances d'approvisionnement en matière première ont varié. Elles ont été de 172 km pour la matière recyclée et de 140 km pour la biomasse forestière.

Les données d'inventaire des comparatifs sont présentées dans le Tableau 27 pour le système alimenté à la biomasse vierge et dans le Tableau 28 pour le système alimenté à la biomasse issue des résidus de CRD.

Tableau 27. Inventaire pour la production de 1 kWh d'électricité à partir de la biomasse vierge

Intrants	Moyenne	Unité	Procédé utilisé dans Simapro	Justificatifs	Référence
Ressources					
Eau	1,25E-02	kg	Water, decarbonised, at user {GLO} market for Alloc Def, U	Données moyennes d'inventaire de la production de chaleur au Canada	Écoinvent 3
Lubrifiants	5,22E-05	kg	Lubricating oil {GLO} market for Alloc Def, U	Données moyennes d'inventaire de la production de chaleur au Canada	Écoinvent 3
Chlorure de sodium	6,52E-05	kg	Sodium chloride, powder {GLO} market for Alloc Def, U	Données moyennes d'inventaire de la production de chaleur au Canada	Écoinvent 3
Copeaux de bois	8,41E-01	kg	Wood chips, wet, measured as dry mass {CA-QC} market for wood chips, wet, measured as dry mass Alloc Def, U	Données moyennes d'inventaire de la production de chaleur au Canada	Écoinvent 3
Chlorure gaz	5,22E-06	kg	Chlorine, gaseous {RoW} market for Alloc Def, U	Données moyennes d'inventaire de la production de chaleur au Canada	Écoinvent 3
Nox	1,27E-03	kg	NOx retained, by selective catalytic reduction {GLO} market for Alloc Def, U	Données moyennes d'inventaire de la production de chaleur au Canada	Écoinvent 3
Ammoniaque	1,30E-07	kg	Ammonia, liquid {RoW} market for Alloc Def, U	Données moyennes d'inventaire de la production de chaleur au Canada	Écoinvent 3
Autres produits chimiques	9,30E-05	kg	Chemical, organic {GLO} market for Alloc Def, U	Données moyennes d'inventaire de la production de chaleur au Canada	Écoinvent 3
Traitement des déchets					
Déchets d'eau	1,25E-05	m ³	Wastewater, average {RoW} market for wastewater, average Alloc Def, U	Données moyennes d'inventaire de la production de chaleur au Canada	Écoinvent 3
Déchets municipaux	5,22E-05	kg	Municipal solid waste {CA-QC} market for Alloc Def, U	Données moyennes d'inventaire de la production de chaleur au Canada	Écoinvent 3
Cendres	8,41E-03	kg	Wood ash mixture, pure {RoW} market for wood ash mixture, pure Alloc Def, U	Données moyennes d'inventaire de la production de chaleur au Canada	Écoinvent 3
Déchets d'huile minérale	5,22E-05	kg	Waste mineral oil {RoW} market for waste mineral oil Alloc Def, U	Données moyennes d'inventaire de la production de chaleur au Canada	Écoinvent 3

Tableau 28. Inventaire pour la production de 1 kWh d'électricité à partir de la biomasse issue des résidus de CRD

Intrants	Moyenne	Unité	Procédé utilisé dans Simapro	Justificatifs	Référence
Ressources					
Eau	1,25E-02	kg	Water, decarbonised, at user {GLO} market for Alloc Def, U	Données moyennes d'inventaire de la production de chaleur au Canada	Écoinvent 3
Lubrifiants	5,22E-05	kg	Lubricating oil {GLO} market for Alloc Def, U	Données moyennes d'inventaire de la production de chaleur au Canada	Écoinvent 3
Chlorure de sodium	6,52E-05	kg	Sodium chloride, powder {GLO} market for Alloc Def, U	Données moyennes d'inventaire de la production de chaleur au Canada	Écoinvent 3
Copeaux de bois	8,41E-01	kg	Wood chips, from post-consumer wood, measured as dry mass {RoW} treatment of waste wood, post-consumer, sorting and shredding Alloc Def, U_CRD	Données moyennes d'inventaire de la production de chaleur au Canada	Écoinvent 3
Chlorure gaz	5,22E-06	kg	Chlorine, gaseous {RoW} market for Alloc Def, U	Données moyennes d'inventaire de la production de chaleur au Canada	Écoinvent 3
NOx	1,27E-03	kg	NOx retained, by selective catalytic reduction {GLO} market for Alloc Def, U	Données moyennes d'inventaire de la production de chaleur au Canada	Écoinvent 3
Ammoniaque	1,30E-07	kg	Ammonia, liquid {RoW} market for Alloc Def, U	Données moyennes d'inventaire de la production de chaleur au Canada	Écoinvent 3
Autres produits chimiques	9,30E-05	kg	Chemical, organic {GLO} market for Alloc Def, U	Données moyennes d'inventaire de la production de chaleur au Canada	Écoinvent 3
Traitement des déchets					
Déchets d'eau	1,25E-05	m ³	Wastewater, average {RoW} market for wastewater, average Alloc Def, U	Données moyennes d'inventaire de la production de chaleur au Canada	Écoinvent 3
Déchets municipaux	5,22E-05	kg	Municipal solid waste {CA-QC} market for Alloc Def, U	Données moyennes d'inventaire de la production de chaleur au Canada	Écoinvent 3
Cendres	8,41E-03	kg	Wood ash mixture, pure {RoW} market for wood ash mixture, pure Alloc Def, U	Données moyennes d'inventaire de la production de chaleur au Canada	Écoinvent 3
Déchets d'huile minérale	5,22E-05	kg	Waste mineral oil {RoW} market for waste mineral oil Alloc Def, U	Données moyennes d'inventaire de la production de chaleur au Canada	Écoinvent 3

5.11 Analyse de sensibilité

Cette analyse avait aussi pour objectif l'identification des paramètres sensibles. À cette fin, un paramètre sensible a été identifié. Il s'agit de l'ajout de 20 % de fibres recyclées dans la fibre vierge utilisée pour la production des différents produits de bois analysés. Le 20 % a été considéré parce qu'il est représentatif de ce qui se fait actuellement dans l'industrie du panneau de bois et en concordance avec les essais faits en laboratoire pour le cas des panneaux de particules. Pour chaque produit analysé dans la cascade, un mélange de fibres (20 % recyclées et 80 % vierges) comme intrant a donc été considéré pour sa production.

Les inventaires de cette analyse ont été basés sur ceux des scénarios précédents. Les processus de production (fibre vierge) et de préparation du bois (fibre recyclée) destiné à la fabrication d'un produit ont été multipliés respectivement par 0,8 et 0,2 correspondent à la composition 80 % de fibres vierges et 20 % de fibres recyclées. Les étapes de cycle de vie production (fabrication proprement dite), fin de vie et la valorisation des déchets via cogénération sont demeurées invariables. Dans la modélisation de cette sensibilité, les procédés de modélisation étaient identiques à ceux utilisés dans le cadre des précédents scénarios.

5.12 Résultats et interprétations

Dans cette analyse de cycle de vie conséquentielle (ACV-C), il a été utilisé la méthode d'analyse des impacts environnementaux TRACI 2.1 qui est une méthode adaptée au contexte nord-américain. Elle est caractérisée par le fait qu'elle se limite aux catégories d'impacts intermédiaires (*Midpoint* en anglais). Bien qu'elle présente un grand nombre d'indicateurs, les résultats et l'interprétation développés dans cette étude d'ACV-C ont été focalisés sur 5 indicateurs en conformité avec les règles de catégorie de produit (*Product Category Rules* en anglais) [41]. Ces indicateurs sont : changement climatique, destruction de la couche d'ozone, smog, acidification et eutrophisation. En raison du fait que le projet se situe dans le cadre du développement des connaissances sur les matériaux à faible empreinte carbone, un accent a été mis sur l'indicateur changement climatique, en l'occurrence sur les émissions des gaz à effet de serre (GES). Dans cet exercice de comparaison des résultats, il est important de signifier les différences entre les comparables, pour chaque indicateur analysé.

Les résultats de l'analyse de cycle de vie conséquentielle des différents produits fabriqués à partir de fibres vierges versus fibres recyclées sont présentés et interprétés à trois niveaux d'analyse. Le premier niveau présente les résultats de l'ACV avec procédés évités. Le deuxième niveau présente les résultats de l'ACV conséquentielle avec effet de la substitution marché. Le troisième niveau présente les résultats de l'analyse de sensibilité. Pour faire référence aux scénarios indiqués dans le schéma de la cascade (Figure 1), les respectifs scénarios sont indiqués dans les titres des sections ci-dessous. Ils commencent au scénario 2 et se terminent au scénario 5, car le scénario 1 fait référence à la caractérisation du bois de CRD reçu du centre de tri qui n'est pas analysé dans cette section du rapport. Dans les tableaux indiquant les valeurs absolues des différentes catégories d'impacts, lorsque ces valeurs sont inférieures à 1, les catégories sont exclues des tableaux pour alléger le contenu.

5.12.1 Comparaison des profils environnementaux des produits

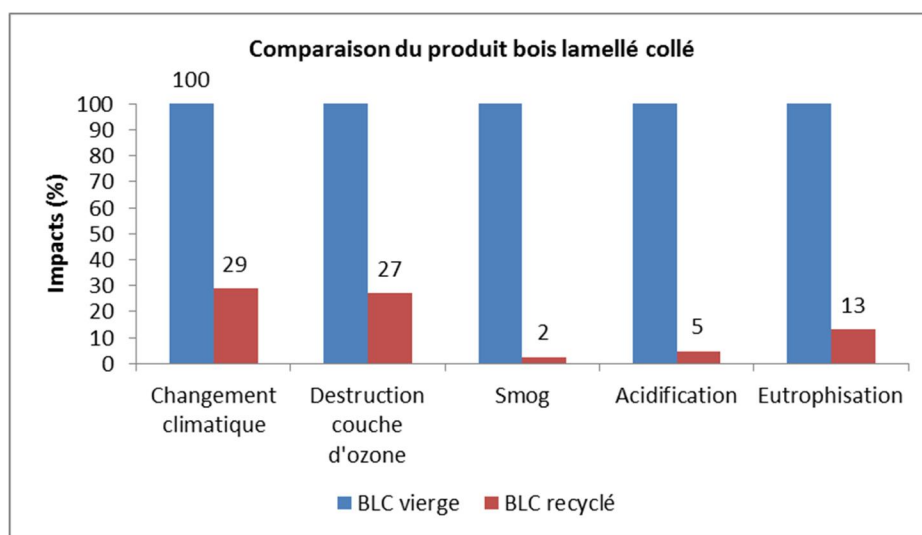
Dans cette section, les profils environnementaux des différents produits analysés sont présentés et interprétés. Les résultats comparent le cycle de vie de chaque produit, du berceau au tombeau. Seuls les processus affectés par la décision de fabriquer des produits avec 100 % de fibre recyclée ont été inclus dans le modèle analysé. Tout processus non affecté par cette décision est exclu de l'analyse en raison des motifs illustrés dans la section 5.9.2.

5.12.1.1 Scénario 2 : Bois lamellé-collé

Les résultats obtenus de la comparaison du cycle de vie du produit bois lamellé-collé sont présentés à la Figure 28. Le bois lamellé-collé fabriqué à partir de la fibre de bois recyclée (fibre CRD) présente un fardeau environnemental plus faible comparativement au produit fabriqué avec la fibre vierge. Les différences relatives varient entre 71 % et 98 % en fonction des impacts environnementaux. Ces différences relatives entre les deux types de fibres utilisées pour la fabrication du bois lamellé-collé sont significatives. En effet, elles sont

supérieures aux minimums relatifs significatifs indiqués dans la littérature scientifique, à savoir 10 %, 50 %, 30 %, 30 % et 30 % respectivement pour les catégories d'impacts changement climatique, destruction de la couche d'ozone, smog, acidification et eutrophisation [26].

L'analyse des émissions GES du cycle de vie du bois lamellé-collé fabriqué avec la fibre CRD indique 71 % moins d'émission comparativement au même produit fabriqué à partir de la fibre vierge. L'étape de cycle de vie qui contribue le plus aux émissions totales de GES est le transport (A2) soit 71,3 % des émissions totales pour le lamellé-collé fabriqué à partir de la fibre recyclée. Dans le cas du lamellé-collé fabriqué à partir de la fibre vierge, le contributeur le plus important est l'étape de cycle de vie production (A1). Elle inclut aussi la première transformation du bois et contribue à 65 % des émissions totales. Ensuite, l'étape A1 est le second contributeur avec 29 % des émissions totales dans le cas de l'utilisation de la fibre recyclée, alors que c'est l'étape de fin de vie qui contribue à 31 % des émissions totales en seconde position dans le cas de l'utilisation de la fibre vierge. Les valeurs absolues présentées dans la Figure 28, indiquent pour la catégorie changement climatique, des émissions évitées de 120 k eq. CO₂ tout au long du cycle de vie d'un m³ de bois lamellé-collé fait à partir de bois de CRD. Ces émissions évitées proviennent essentiellement des modules extraction de la ressource, production du bois d'œuvre et de la fin de vie du produit en comparaison avec le BLC fait avec de la fibre vierge.



Catégories d'impacts	Unité	BLC vierge	BLC recyclé	Différence
Changement climatique	kg CO2 eq	168,2	48,3	119,8
Smog	kg O3 eq	53,5	1,3	52,2
Acidification	kg SO2 eq	2,1	0,1	2

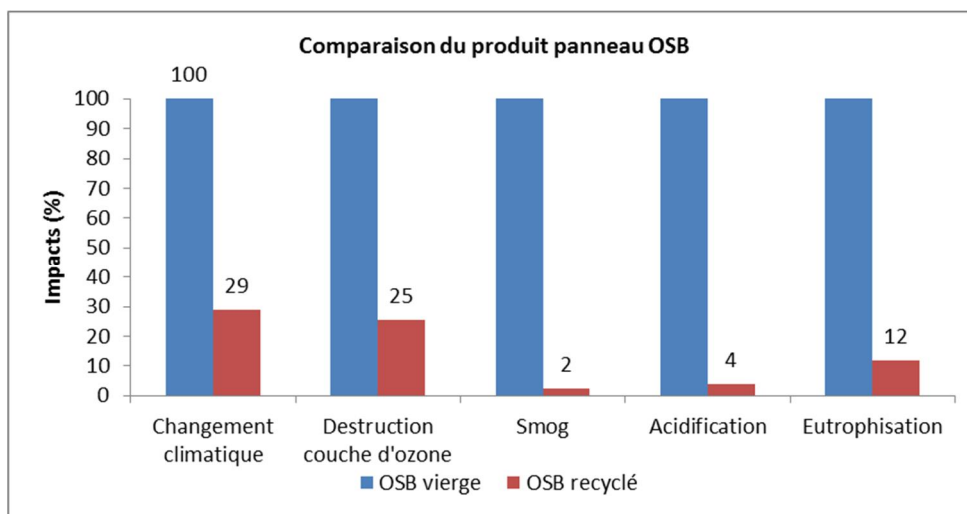
Figure 28. Profil environnemental du bois lamellé-collé

5.12.1.2 Scénario 2 : Panneau OSB

Les résultats obtenus de la comparaison du cycle de vie du produit panneau OSB sont présentés à la Figure 29. Le panneau OSB fabriqué à partir de la fibre de bois recyclée (fibre CRD) présente un fardeau environnemental plus faible comparativement au produit fabriqué avec la fibre vierge. Ces différences relatives entre les deux types de fibres utilisées pour la fabrication du panneau OSB varient de 98 % à 71 % en fonction des catégories

d'impacts analysées. Elles sont significatives pour chacune des catégories d'impacts présentées dans la Figure 29 [26].

L'analyse des émissions GES du cycle de vie du panneau OSB indique 71 % moins d'émission lorsque la fibre recyclée est utilisée comme matière première comparativement à la fibre vierge. Dans le cas d'utilisation de la fibre recyclée, l'étape de cycle de vie qui contribue le plus aux émissions de GES est celle du transport (A2) avec 53 % des émissions totales. Cependant l'étape de préparation du bois de CRD avant la fabrication des panneaux (A1), est le second contributeur avec 47 % des émissions GES totales du cycle de vie. Dans le cas de l'utilisation de la fibre vierge, l'étape de cycle de vie qui contribue le plus aux émissions GES est celle de fin de vie avec 80 % des émissions totales. Les étapes de transport (A2) et extraction de la ressource (A1) représentent respectivement 14 % et 6 % des émissions totales. Pour la catégorie changement climatique, les valeurs absolues présentées à la Figure 29, indiquent, des émissions évitées de 49 k eq. CO₂ tout au long du cycle de vie d'un m³ de bois lamellé-collé. Ces émissions évitées proviennent essentiellement des modules extraction de la ressource et de la fin de vie du produit.



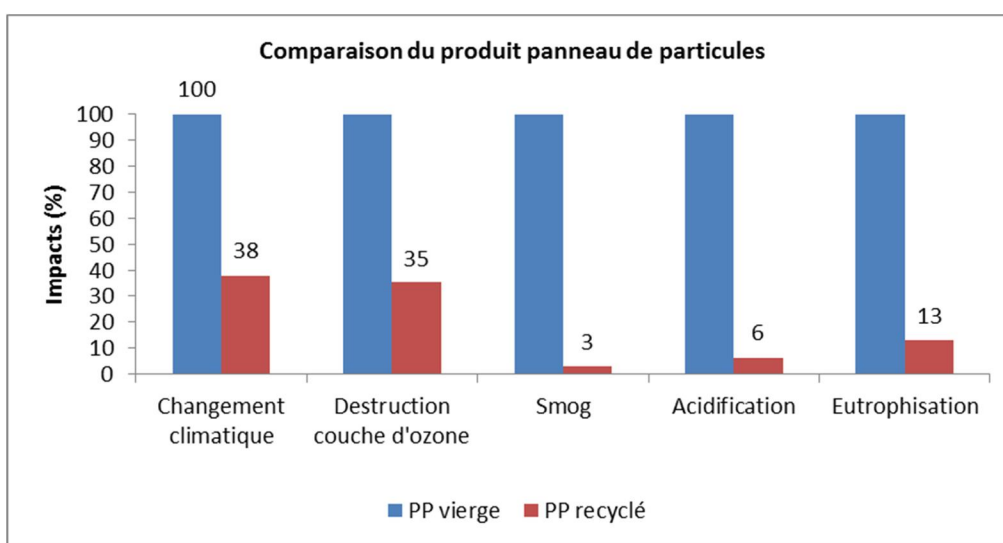
Catégories d'impacts	Unité	OSB vierge	OSB recyclé	Différence
Changeement climatique	kg CO2 eq	69,5	20,1	49,4
Smog	kg O3 eq	29	0,7	28,3
Acidification	kg SO2 eq	1,3	0,1	1,2

Figure 29. Profil environnemental du panneau OSB

5.12.1.3 Scénario 4; Panneau de particules

Les résultats obtenus de la comparaison du cycle de vie du produit panneau de particules sont présentés à la Figure 29. Le panneau de particules fabriqué à partir de la fibre de bois recyclée (fibre CRD) présente un fardeau environnemental plus faible de 62 % à 97 % comparativement au celui fabriqué avec la fibre vierge. Ces différences relatives entre les deux types de fibres utilisées pour la fabrication du panneau de particules sont significatives [26].

L'analyse des émissions GES du cycle de vie du panneau particules indique 62 % moins d'émission lorsque la fibre recyclée est utilisée comme matière première comparativement à la fibre vierge. Dans le cas d'utilisation de la fibre recyclée, le plus important contributeur en termes d'émission GES est l'étape de transport (A2) avec 65 % des émissions totales. Cependant l'étape de préparation du bois de CRD avant la fabrication des panneaux (A1), est le second contributeur avec 35 % des émissions totales en GES du cycle de vie. Dans le cas de l'utilisation de la fibre vierge, le plus important contributeur en termes d'émission GES est l'étape de fin de vie avec 61 % du total. En suite les étapes de cycle de vie transport (A1) et de préparation de biomasse (A1) contribuent respectivement à 28 % et 11 % du total des émissions. Pour la catégorie changement climatique, les valeurs absolues présentées à la Figure 29, indiquent, des émissions évitées de 50 k éq. CO₂ tout au long du cycle de vie d'un m³ de panneau de particules. Ces émissions évitées proviennent essentiellement de l'étape de fin de vie du produit fabriqué à partir de la fibre vierge.



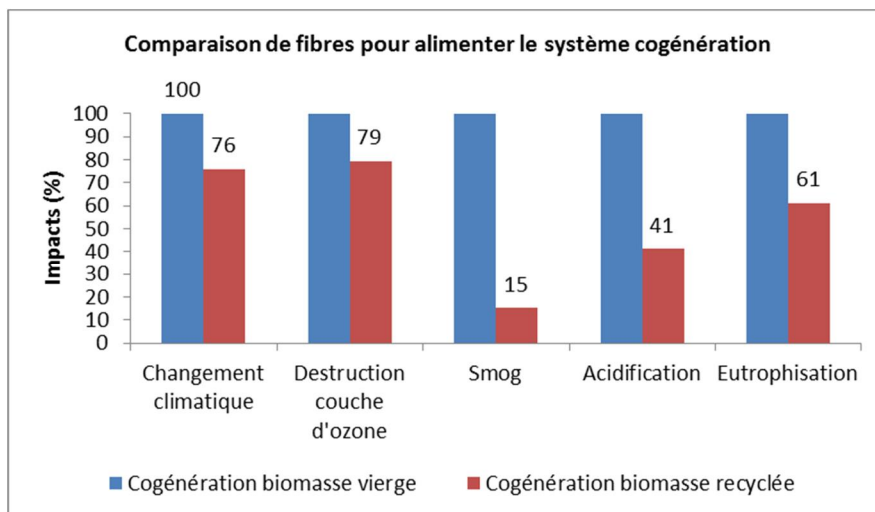
Catégories d'impacts	Unité	PP vierge	PP recyclé	Différence
Changeement climatique	kg CO ₂ eq	81,7	31,3	50,5
Smog	kg O ₃ eq	30,3	0,9	29,3
Acidification	kg SO ₂ eq	1,4	0,1	1,3

Figure 30 Profil environnemental du panneau de particules

5.12.1.4 Scénario 5 : cogénération

Dans le cadre de la production de l'énergie via la cogénération, les résultats obtenus de l'analyse de l'utilisation de deux types de fibres pour alimenter une centrale de cogénération sont présentés à la Figure 31. Les étapes de cycle de vie analysées ont été la préparation d'un m³ de fibre (A1) et le transport (A2) vers le site de la centrale. Les résultats indiquent que l'approvisionnement en fibres CRD a un plus faible fardeau environnemental comparativement à un approvisionnement en fibre vierge. En effet, les impacts environnementaux de l'utilisation de la fibre CRD sont plus bas pour toutes les catégories d'impacts analysées. En fonction de la catégorie d'impact, les différences relatives varient entre 85 % et 21 % et sont toutes

significative [26]. Pour la catégorie d'impact changement climatique, les émissions de GES sont 24 % moins élevées lorsque la fibre CRD a été utilisée comme matière première intrant (input) (Figure 31). Ceci représente des émissions évitées de 2 kg éq. CO₂ par m³ de matière CRD consommée.



Catégories d'impacts	Unité	Cogén. biomasse vierge	Cogén. biomasse recyclée	Différence
Changement climatique	kg CO2 eq	6,5	4,9	1,6
Smog	kg O3 eq	1,1	0,2	0,9

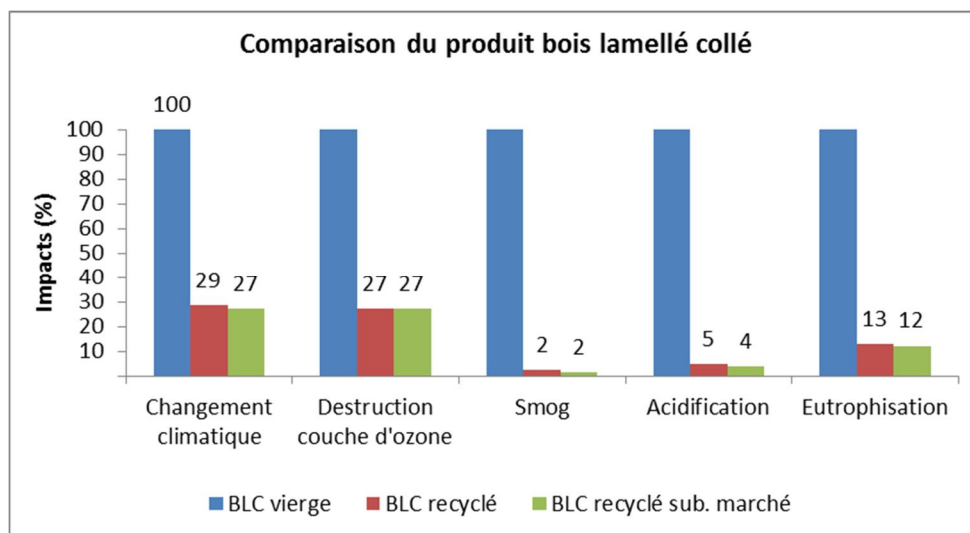
Figure 31. Profil environnemental de la cogénération

5.12.2 Comparaison des profils environnementaux des produits avec effets substitution marché

Dans cette section, les profils environnementaux des différents produits analysés sont présentés et interprétés. Les résultats comparent le cycle de vie de chaque produit, du berceau au tombeau comme présenté à la section 5.12.1 avec ajout des effets de la substitution marché.

5.12.2.1 Scénario 2 : Bois lamellé-collé (BLC)

L'analyse des profils environnementaux de cycle de vie des produits bois lamellé-collé (BLCs) avec substitution marché révèle que la considération de la substitution marché n'a pas d'impact significatif sur les résultats obtenus (Figure 32). Les impacts relatifs sont similaires à ceux obtenus précédemment dans le cas du BLC fabriqué à partir de la fibre CRD. En effet, la substitution de 63 % d'approvisionnement en fibres vierges pour la fabrication des panneaux OSB, réduit de 2 % les émissions de GES du cycle de vie du BLC fabriqué à partir de fibre recyclée, soit 2,5 kg éq. CO₂. Cette différence relative entre le BLC recyclé et le BLC recyclé avec effet substitution marché, pour la catégorie d'impact changement climatique, tout comme celles pour toutes les autres catégories d'impacts étudiées ne sont pas significatives, car en dessous des minimums relatifs significatifs indiqués par Humbert et al. [26].

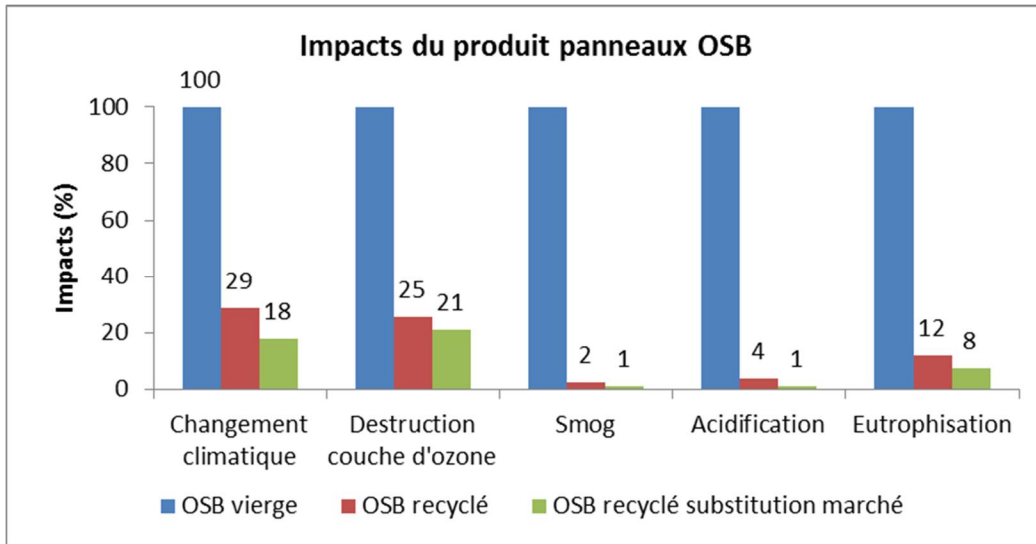


Catégories d'impacts	Unité	BLC vierge	BLC recyclé sub. marché	Différence
Changement climatique	kg CO2 eq	168,2	45,9	122,3
Smog	kg O3 eq	53,5	0,9	52,6
Acidification	kg SO2 eq	2,1	0,1	2

Figure 32. Profil environnemental comparatif du BLC avec substitution marché

5.12.2.2 Scénario 3 : Panneaux OSB

L'analyse des profils environnementaux de cycle de vie des produits panneaux OSB avec substitution marché révèle que la considération de la substitution marché a des impacts significatifs sur les résultats obtenus (Figure 32). En ce sens que les différences relatives entre le produit OSB recyclé et OSB recyclé plus substitution marché sont significatives [26]. Ces différences sont 38 %, 16 %, 50 %, 75 % et 33 % plus bas comparativement aux impacts du panneau OSB recyclé sans substitution marché, respectivement pour les catégories d'impacts changement climatique, destruction de la couche d'ozone, smog, acidification et eutrophisation. L'impact de la substitution marché de 88 % d'approvisionnement en fibres vierges pour la fabrication des panneaux de particules, représente une réduction de 7,6 kg éq. CO₂ d'émissions de GES comparativement aux émissions associées à la production des panneaux OSB en absence des effets substitution marché.

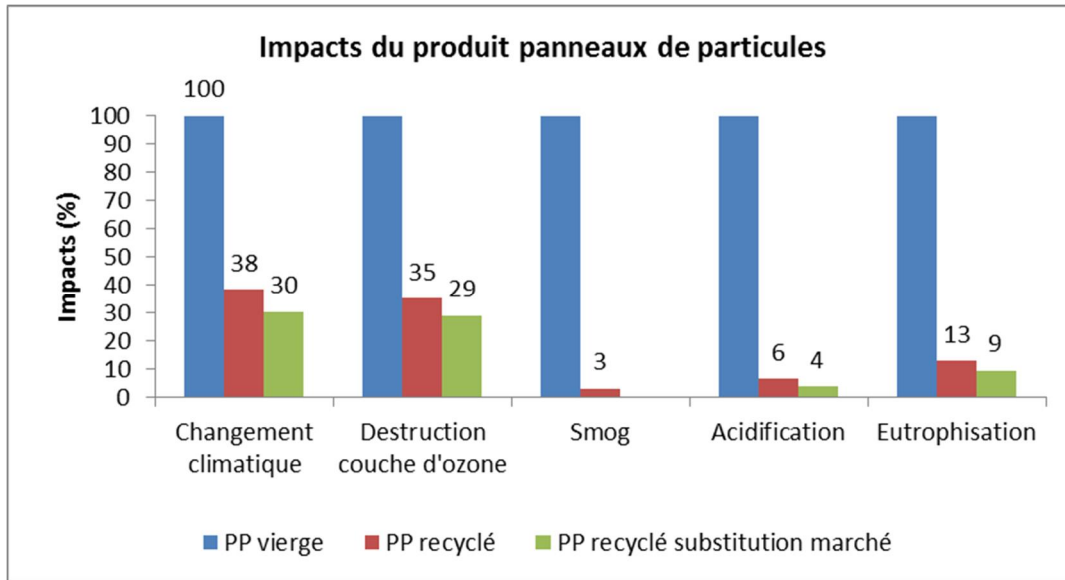


Catégories d'impacts	Unité	OSB vierge	OSB recyclé sub, marché	Différence
Changement climatique	kg CO2 eq	69,5	12,5	57
Smog	kg O3 eq	29,0	0,3	28,6
Acidification	kg SO2 eq	1,3	0,0	1,3

Figure 33. Profil environnemental comparatif des panneaux OSB avec substitution marché

5.12.2.3 Scénario 4 : Panneaux de particules (PP)

L'analyse des profils environnementaux de cycle de vie des produits panneaux *de* particules avec substitution marché révèle que la considération de la substitution marché a des impacts significatifs sur les résultats obtenus (Figure 32). En ce sens que les différences relatives entre le produit PP recyclé et PP recyclé plus substitution marché sont significatives [26]. Ces différences sont 21 %, 17 %, 100 %, 33 % et 33 % plus bas comparativement aux impacts du panneau PP recyclé sans substitution marché, respectivement pour les catégories d'impacts changement climatique, destruction de la couche d'ozone, smog, acidification et eutrophisation. L'impact de la substitution marché de 100 % d'approvisionnement en fibres vierges pour alimenter la centrale thermique, représente une réduction de 6,5 kg éq. CO₂ d'émissions de GES comparativement aux émissions associées à la production des panneaux PP en absence des effets substitution marché.



Catégories d'impacts	Unité	PP vierge	PP recyclé sub, marché	Différence
Changement climatique	kg CO2 eq	81,7	24,8	56,9
Smog	kg O3 eq	30,3	-0,1	30,4
Acidification	kg SO2 eq	1,4	0,1	1,3

Figure 34. Profil environnemental comparatif des panneaux de particules avec substitution marché

5.12.3 Analyse de sensibilité

Cette section présente les résultats obtenus de l'analyse de sensibilité. Le paramètre sensible analysé était le mélange de fibres utilisées pour la fabrication des différents produits de la cascade y compris la production énergétique. Les proportions du mélange étaient 20 % fibres CRD et 80 % fibres vierges. Il est aussi important de souligner le fait que cette analyse de sensibilité a été mise en comparaison avec le cycle de vie des produits fabriqués à partir de fibres vierges et celui des produits fabriqués à partir fibres recyclées. Ces comparables ont été analysés sans la considération des impacts conséquents sur l'environnement causés par la substitution marché.

Les résultats obtenus de l'analyse de sensibilité sont présentés dans la Figure 35A-B-C-D. De manière générale, le mélange de fibres n'a pas d'impact significatif sur le cycle de vie des différents produits analysés si comparés à la fibre vierge, étant donné que les différences relatives sont inférieures aux seuils de valeur significative proposés par Humbert et al. [26]. Cependant, il serait intéressant de présenter ces résultats afin d'illustrer aux lecteurs les effets de l'utilisation du mélange des fibres dans le ratio 20%-80%, sur le profil environnemental du cycle de vie des produits fabriqués. L'utilisation du mélange de fibres dans le cycle de vie des produits fabriqués réduit le fardeau environnemental des mêmes produits s'ils étaient produits avec 100 % de fibre vierge. Ceci est plus marqué dans le cas du produit BLC et dans la cogénération (Figure 35A et Figure 35B). En effet, considérant la catégorie d'impact changement climatique, les réductions d'émissions de GES sont de 7 %, soit 12 kg éq. CO₂ pour le produit BLC et 5 %, soit 0,3 kg éq. CO₂ pour la cogénération. Dans le cas du panneau

de particules, l'utilisation du mélange de fibre présente 1 % plus d'impacts que l'utilisation de la fibre vierge pour la catégorie d'impact changement climatique, soit 0,5 kg éq. CO₂. Ce dépassement de la fibre mixte a été causé par l'impact supérieur de 20 % de fibres recyclées, soit 2,22 kg éq. CO₂) versus 1,74 kg éq. CO₂ comparativement à 20 % de fibres vierges, car le volume de fibres broyées est 8 % plus élevé dans le cas de fibre recyclée (1,36 m³ versus 1,25 m³).

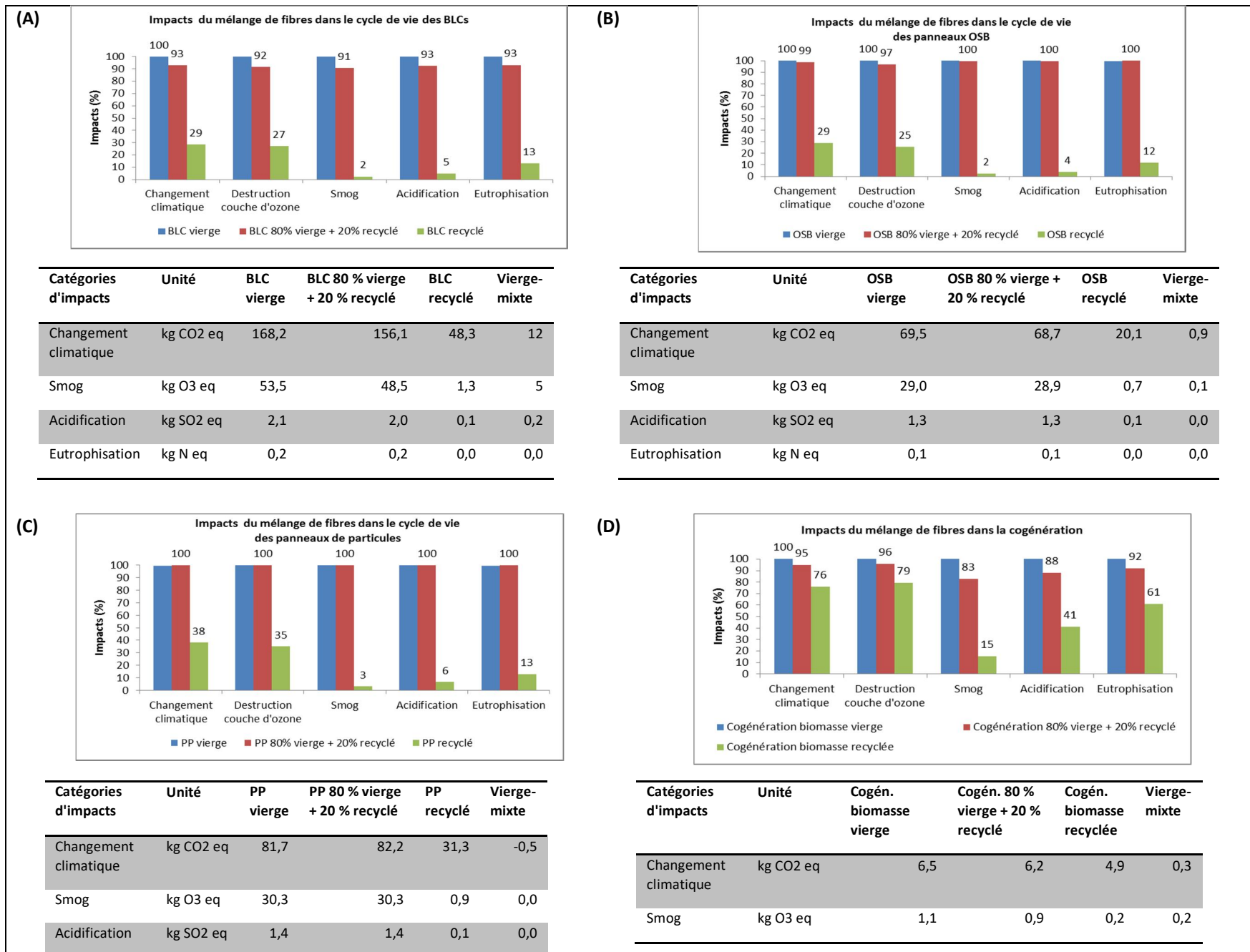


Figure 35. Profils environnementaux de l'analyse de sensibilité

5.12.4 Discussion

Les résultats de l'analyse de cycle de vie conséquentielle présentée dans la section 5.13.2 ont mis en évidence les émissions de GES évitées, grâce à l'utilisation de la fibre recyclée versus la fibre vierge dans la fabrication des produits de la cascade.

Les étapes de cycle de vie analysées étaient l'extraction des ressources (A1), le transport (A2) et la fin de vie (C2-C3 et D). Dans le cas du BLC fabriqué avec la fibre vierge, l'étape A1 inclut aussi la production du bois d'œuvre. Cette étape est le plus important contributeur en termes d'émission de GES. En effet, les émissions de GES qui y sont associées représentent 65 % des émissions totales, soit 109 kg éq. CO₂ des émissions de GES totales du cycle de vie. La contribution importante de l'étape de cycle de vie A1, sur le total des émissions de GES corrobore l'étude publiée dans la littérature [42, 46].

En général, il s'avère que la fabrication du bois lamellé-collé (premier produit du processus en cascade analysé) nécessite des pièces de bois de qualité (longueur, grade 1 ou 2). À cet effet, le tri à la source (hiérarchie des 3RV-E) permettrait d'améliorer la qualité de la matière première. Cette opération permettrait notamment de réduire l'énergie consommée à la séparation du bois dans les centres de tri et de réduire l'empreinte carbone du processus d'usinage du bois (élimination des métaux, sciage et rabotage) avant l'envoi à la fabrication du lamellé-collé. En effet, les opérations au centre de tri et pré usinage du bois CRD, contribuent à hauteur de 24 % des émissions totales de GES du cycle de vie du BLC fabriqué à partir de la fibre recyclée. Dans le cas des produits panneaux OSB, panneaux de particules et cogénération, les opérations au centre de tri ont représenté respectivement 47 %, 35 % et 48 % des émissions GES totales de cycle de vie de chaque produit.

Dans le cadre de la présente étude, les émissions GES des produits analysés ont permis de corroborer les données de la littérature [47, 48, 8, 46]. La quantité annuelle de la fibre de bois issu de la CRD, reçu par les centres de tri québécois, recyclé ou valorisé est estimée à 444 000 tonnes de fibres [2]. Si l'hypothèse selon laquelle toute cette fibre était utilisée dans les nouveaux de bois, la quantité d'émission de GES évitée annuellement serait non négligeable si rattaché à une perspective de recyclage en cascade.

5.13 Conclusions analyse environnementale

Cette analyse de cycle de vie conséquentielle avait pour objectif de mettre en évidence les conséquences environnementales d'une décision prise. Celle-ci était de fabriquer les produits de bois en utilisant 100 % de fibres de la CRD. À cette occasion, les profils environnementaux de divers produits de bois fabriqués à partir de fibres vierges ont été comparés à ceux des produits fabriqués à partir de la fibre recyclée. L'expansion des frontières des systèmes a permis d'intégrer la composante substitution marché dans l'analyse.

Les résultats obtenus indiquent des différences relatives significatives entre le cycle de vie des produits fabriqués à partir de la fibre vierge et celui des produits fabriqués à partir de la fibre recyclée. L'analyse des résultats avec et sans effet substitution marché indique que pour un (1) m³ de produit fabriqué avec la fibre recyclée, les émissions moyennes de GES évitées tout au long de son cycle de vie ont été de 121 kg éq. CO₂ pour le produit BLC, de 53,2 kg éq. CO₂ pour le produit panneaux OSB, de 53,7 kg éq. CO₂ pour le produit panneaux de particules et de 3,2 kg éq. CO₂ pour la cogénération. Ces résultats ont validé l'hypothèse posée dans cette étude. Il est toutefois important de souligner le fait que, les différences relatives générées par le facteur substitution marché ne sont pas significatives entre les produits fabriqués à partir de la fibre recyclée. Cependant, ce facteur augmente l'écart entre les produits fabriqués à partir de la fibre recyclée

comparativement à la fibre vierge. Le remplacement de 20 % de fibres vierges par un égal pourcentage de fibres recyclées ne présente non plus de différence relative significative.

Cette étude révèle par ailleurs que la fabrication des produits de bois à partir de fibres recyclées réduit l'empreinte carbone du cycle de vie des produits comparativement à l'usage de la fibre vierge. Cependant, la qualité de la fibre recyclée demeure un enjeu important pour améliorer et optimiser le recyclage du bois de CRD. En effet, une meilleure qualité du bois de CRD pourrait améliorer les rendements à la fabrication et réduire les émissions de GES associées aux procédés de traitement de celui-ci avant la fabrication proprement dite des produits.

6. CONCLUSIONS GÉNÉRALES

Le présent projet de recherche avait pour objectifs d'étudier la faisabilité technique et économique ainsi que l'empreinte carbone du recyclage en cascade du bois de CRD. Le processus de cascade analysé passe par la fabrication de différents produits de bois (BLC, panneaux OSB et panneaux de particules) et se termine par la production énergétique. L'utilisation des produits de bois en remplacement des matériaux de construction à fortes émissions de GES, tels que l'acier, l'aluminium et le béton, peut entraîner des réductions importantes des émissions de GES [42, 43] et contribuer ainsi aux objectifs de réduction des GES du gouvernement provincial.

Comme démontré tout au long de cette étude, la considération des résidus de CRD (bois) en tant que matière première de choix, pourrait intégrer différentes industries de la filière bois. Il est important de souligner qu'au cours des procédés de fabrication en laboratoire des innovations sur les matériaux n'ont pas été faites. L'ajout de l'innovation dans les procédés aurait permis d'avoir l'ensemble des produits de bois fabriqués avec 100 % de fibre CRD, conformément aux normes en vigueur. Au regard des résultats obtenus, l'utilisation de la fibre CRD dans la fabrication des produits de bois est belle et bien faisable, car le matériau présente de bonnes propriétés similaires au bois vierge comme par exemple la facilité au collage. À la fin de la cascade, la considération de la fibre recyclée comme combustible aux fins énergétiques ne représente aucune problématique majeure. En effet, en cas de combustion, les émissions dans l'atmosphère des polluants majeurs identifiés par caractérisation chimique des produits issus de la cascade pourraient être en dessous des limites prévues la RAA Québec si les technologies de combustion appropriées sont utilisées.

Les résultats de l'analyse économique ont montré les marges (\$) possibles dans différents segments de l'industrie de transformation du bois grâce à l'intégration de la fibre recyclée dans la chaîne d'approvisionnement. Du point de vue environnemental, l'intégration de la fibre CRD dans les processus de fabrication des produits de bois permettrait de réduire davantage l'empreinte carbone de ces produits. De ce fait, les produits de bois deviendraient encore plus compétitifs par rapport aux autres matériaux/produits de construction disponibles sur le marché. Cependant, dans le cas d'une industrialisation des procédés d'usage de la fibre CRD pour la fabrication des produits BLC et panneaux OSB, le risque de bris ou d'usure précoce des outils de coupe en industrie subsiste. En ce sens, l'utilisation d'un détecteur de métal permettrait de réduire fortement, voir éliminerait ce risque.

Les bienfaits économiques et environnementaux tout comme la faisabilité technique, illustrés dans ce rapport, démontrent le potentiel réel de cette matière résiduelle, aujourd'hui sous-utilisée. Ce projet démontre aussi qu'il est possible de maximisation du recyclage par l'ajout d'une ou plusieurs étapes intermédiaires avant la valorisation énergétique de la fibre. De ce fait, le pourcentage de résidus actuellement valorisés en énergie serait réduit et les effets sur la récolte des arbres et approvisionnement des usines en fibres vierge seraient réduits en conséquence.

Actuellement, l'utilisation de la fibre CRD dans fabrication des produits de bois est plus présente dans l'industrie du panneau aggloméré (panneaux de particules, panneaux de fibres à moyenne et haute densité). Cette utilisation devrait s'étendre aux autres industries de la seconde transformation du bois (CLT, bois lamellé-collé, OSB). Cependant la qualité de la fibre disponible pour ces industries constitue une limitation importante. Afin de développer le créneau de recyclage en cascade de la fibre de CRD, des efforts restent à fournir, notamment pour améliorer la qualité de la matière utilisable par chaque segment de l'industrie de transformation du bois. C'est dans cette perspective que les recommandations ci-dessous sont formulées.

7. RECOMMANDATIONS

Au regard des résultats obtenus des différentes analyses réalisées, la fabrication en cascade des produits de bois avec 100 % de fibres issus de la CRD en tenant compte des aspects économiques et environnementaux est faisable. Comme dans tout processus de fabrication, la qualité de la matière première à l'entrée du système de production (input) influence fortement la qualité du produit fabriqué (output), car une bonne qualité de matière permet d'éviter des coûts supplémentaires liés à sa transformation préalable et par conséquent réduit le fardeau environnemental du produit fabriqué.

Pour améliorer la qualité de la fibre, il serait pertinent d'expérimenter des nouvelles formes collaboratives de tri à la source dans les bâtiments en fin de vie. Cette collaboration devra interpeller autour de la table différents acteurs du secteur du bâtiment, de la gestion des résidus CRD et l'industrie de la deuxième transformation du bois (utilisatrice finale de la ressource). À ce titre, il faudrait :

- mettre au point une plateforme interactive et collaborative sur les bâtiments en fin de vie, en vue d'une démolition/déconstruction sélective (tri à la source);
- mettre en place une réglementation en matière de tri à la source;
- mettre au point une structure industrielle de tri pour acheminer la fibre recyclable auprès des industries utilisatrices;
- attribuer une valeur ajoutée en termes de points ou de crédits dans les systèmes d'évaluation de performance des bâtiments (ex. LEED), aux matériaux de construction fabriqués à partir de la fibre recyclée et utilisés dans le bâtiment;
- instaurer des mécanismes incitatifs qui encourageraient les opérateurs du secteur de la construction à une séparation des résidus démolis/déconstruits à la source.

8. LIMITES DE L'ÉTUDE

Aux regards des résultats obtenus et des conclusions faites, la présente étude aurait pu être améliorée. Au niveau de la faisabilité technique (première partie du projet), le traitement à la vapeur de la fibre issue des panneaux OSB aurait probablement permis d'améliorer la qualité de la fibre avant son utilisation pour la fabrication des panneaux de particules. La réalisation des essais de combustion des échantillons de bois de CRD et des produits fabriqués aurait permis de quantifier avec précision les émissions dans l'atmosphère des polluants majeurs identifiés par caractérisation chimique.

Au niveau de l'analyse économique, par le fait que les industries (lamellé-collé et OSB) n'intègrent pas actuellement la fibre recyclée dans leurs processus de fabrication, il a été impossible d'avoir des données réelles. Cependant cette absence de données a amené les professionnels à poser des hypothèses et faire des considérations. Ces hypothèses et considérations de coûts rapportés à l'analyse sont basées sur les meilleures connaissances des professionnels et sur des entrevues téléphoniques. L'obtention de ces données de coûts sur une base de production réelle en usine aurait apporté de la précision aux marges obtenues par rapport aux coûts d'opération des usines grâce à l'utilisation de la fibre recyclée dans leurs processus de fabrication.

Du point de vue de l'analyse de cycle de vie, l'analyse des incertitudes et leurs effets ont été analysés partiellement, car une analyse Monte-Carlo aurait pu être réalisée pour compléter et donner plus de certitude au modèle. Le remplacement de 20 % de fibres vierges par un égal pourcentage de fibres recyclées n'a pas

présenté de différences relatives significatives. Cependant, il aurait été intéressant d'identifier les ratios de mélange des fibres qui auraient porté à des différences relatives significatives.

Un point d'analyse qui se veut intéressant est l'inclusion de l'écosystème forestier dans l'expansion des frontières du système analysé, car les sites récemment récoltés sont des émetteurs nets de CO₂ pendant environ 13 à 14 ans [53].

Il est aussi important de noter que le système de recyclage en cascade étudié représente une situation à l'équilibre qui ne pourrait se réaliser pleinement qu'après plusieurs décennies. Cependant, les effets sur les résultats obtenus, d'un démarrage en parallèle de chaque scénario à partir du bois CRD disponible restent intéressants à investiguer.

9. RÉFÉRENCES

- [1] Ministère de l'Environnement et de la Lutte aux Changements Climatiques, «Gestion des résidus du secteur de la construction, de la rénovation et de la démolition (CRD)», Québec, 2014.
- [2] Recyc-Québec, «Bilan 2015 de la gestion des matières résiduelles au Québec», 2015.
- [3] Ministère de l'Environnement et de la Lutte aux Changements Climatiques, «Guide des bonnes pratiques pour la gestion des matériaux de démantèlement», Québec, 2002.
- [4] Semaine Québécoise de Réduction des Déchets, 2018. [En ligne]. [Accès le 18 01 2019].
- [5] Recyc-Québec, «Structure de l'industrie de la récupération du bois provenant de la construction, la valorisation et la démolition au Québec», Québec, 2012.
- [6] V. Kazulis, I. Muizniece, L. Zihare et D. Blumberga, «Carbon storage in wood products» *Energy Procedia (ScienceDirect)*, p. 6, 2017.
- [7] B. Lippke, J. Wilson, J. Meil et A. Taylor, «Characterizing the importance of carbon storage in wood products» *Wood and Fiber Science*, pp. 5-14, 2010.
- [8] M. H. Kim et H. B. Song, «Analysis of the global warming potential for wood waste recycling systems» *Journal of cleaner production*, pp. 199-207, 2014.
- [9] T. Biechele, Y. H. Chui et M. Gong, «Comparison of NDE techniques for assessing mechanical properties of unjointed and finger-jointed lumber» *Holzforschung*, pp. 397-401, 2011.
- [10] CSA O86-2014, Règles de calcul des charpentes en bois, Toronto (Ontario) Canada: Groupe CSA, 2014.
- [11] Canadian Standard Association (CSA), *CAN/CSA-O437.1 serie-93 (R2011) Standard for OSB and Waferboard*, Ottawa (Ontario), 1993.
- [12] ASTM D1037, *Standard test methods for evaluating properties of wood-base fiber and particle panel materials*, West Conshohocken (Pennsylvanie), 2012.
- [13] American National Standard Institute (ANSI), *ANSI 208.1. 2009 Particleboard*, New York City: Composite Panel Association, <https://www.compositepanel.org/userfiles/filemanager/5501d8170c259/>, 2009.
- [14] CanmetÉnergie Ottawa, *Principal organisme au Canada pour la recherche et la technologie en matière d'énergie propre*, Ottawa, 2018.
- [15] ASTM D4326. *Standard Test Method for Major and Minor Elements in Coal and Coke Ash By X-Ray Fluorescence*, Conshohocken (Pennsylvania): ASTM International, 2013.
- [16] ASTM D7582. *Standard Test Methods for Proximate Analysis of Coal and Coke by Macro Thermogravimetric Analysis*, Conshohocken (Pennsylvania), 2015.
- [17] ISO 562. *Houille et coke: Détermination des matières volatiles*, Genève - Suisse, 2010.

- [18] ISO 1928. *Combustibles minéraux solides : Détermination du pouvoir calorifique supérieur par la méthode de la bombe calorimétrique et calcul du pouvoir calorifique inférieur*, Genève - Suisse, 2009.
- [19] ASTM D5373. *Standard Test Methods for Determination of Carbon, Hydrogen and Nitrogen in Analysis Samples of Coal and Carbon in Analysis Samples of Coal and Coke*, Conshohocken (Pennsylvania), 2016.
- [20] I. P. C. C., *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*, 2006.
- [21] Gouvernement de Québec, *Réglementation sur l'assainissement de l'atmosphère*, Québec : Éditeur officiel du Québec, 2019.
- [22] M. Del Degan, «Structure de l'industrie de la récupération du bois provenant de la construction, la rénovation et la démolition au Québec», Québec, Septembre 2012.
- [23] ISO 14044, *Environmental management - life cycle assessment - Requirement and guidelines*, 2006b.
- [24] ISO 14040. *Management environnemental-Analyse de cycle de vie-Principes et cadre*, Genève - Suisse, 2006.
- [25] ISO 14067, *Carbon footprint of products - Requirements and guidelines for quantification and communication*, 2012.
- [26] O. Jolliet, M. Saadé et P. Crettaz, *Analyse du cycle de vie : Comprendre et réaliser un écobilan*, PPUR Presses polytechniques, 2010.
- [27] ISO. 21930, *Sustainability in buildings and civil engineering works — Core rules for environmental product declarations of construction products and services*, Genève - Suisse, 2017.
- [28] Forintek. Canada. Corp, «Wood-Based Panel Production», 1998.
- [29] B. P. Weidema, *LCA masterclass (Discussion about the use of general equilibrium model in consequential life cycle assessment ed.)*, Montreal, 2010.
- [30] B. P. Weidema, A. M. Nielsen et N. Frees, «Marginal production technologies for life cycle inventories» *International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 1, n° 14, p. 9, 1999.
- [31] P. Lesage, L. Deschenes et R. Samson, «Evaluating holistic environmental consequences,» *Environmental Management of brownfield management options using consequential life cycle assessment for different perspectives*, vol. 40, p. 15, 2007.
- [32] C. Gaudreault, R. Samson et P. Stuart, «Energy decision making in a pulp and paper mill: selection of LCA system boundary» *International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 2, n° 115, pp. 198-211, 2010.
- [33] T. Dandres, Développement d'une méthode d'analyse du cycle de vie conséquentielle prospective macroscopique : évaluation d'une politique de bioénergie dans l'Union européenne à l'horizon 2025, Montréal: École Polytechnique de Montréal, 2012.
- [34] C. Gaudreault, Cadre méthodologique de gestion du cycle de vie appliqué à l'industrie papetière, Montréal: École polytechnique de Montréal, 2008.

- [35] SimaPro. v. 8, *Logiciel de modélisation en ACV, PRé Consultants bv*, 2018.
- [36] A. Franklin Associates, «Cradle-to-gate life cycle inventory of nine plastic resins and four polyurethane precursors» *Plastic Division of American Chemistry Council (ACC)*, 2011.
- [37] F. M. Menten, S. Tchung-ming, D. Lorne et F. Bouvart, «Lessons from the use of a long-term energy model for consequential life cycle assessment : the BTL case» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, pp. 43, 942–960., 2015.
- [38] T. Dandres, C. Gaudreault, P. Tirado-Seco et R. Samson, «Macroanalysis of the economic and environmental impacts of a 2005–2025 European Union bioenergy policy using the GTAP model and life cycle assessment» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, p. 1180–1192, 2012.
- [39] C. Gaudreault et Reid Miner, «Method for open-loop recycling allocation in life cycle assessment and carbon footprint studies of paper products» Montréal, 2012.
- [40] A. L. Nicholson , É. A. Olivetti, J. R. Gregory, F. R. Field et R. E. Kirchain, «End-of-life LCA allocation methods: open loop recycling impacts on robustness of material selection decisions» *Sustainable Systems and Technology*, pp. 1-6, 2009.
- [41] I. Herrmann, M. Hauschild, M. Sohn et T. McKone, «Confronting Uncertainty in Life Cycle Assessment Used for Decision Support» *Journal of Industrial Ecology*, p. 366–379., 2014.
- [42] Humbert et al., *Impact 2002+ - User guide (draft for version 2.1). IMPACT Modeling.*, Lausanne - Switzerland: IMPACT 2002+, 2010.
- [43] TRACI:, *Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and other environmental Impacts: <http://www.epa.gov/ORD/NRMRL/std/sab/traci/>.*
- [44] FPIInnovations, *Product Category Rules (PCR) for preparing an Environmental Product Declaration (EPD) for North American Structural and Architectural Wood Products, Version 1 (UN CPC 31, NAICS 321), November 8, 2011.*, Québec, 2011.
- [45] Athena Sustainable Materials Institute, «A Cradle-to-gate Life Cycle Assessment of Canadian Glulam» 2018.
- [46] USLCI, *Data base:*<http://www.nrel.gov/lci>.
- [47] Athena Sustainable Materials Institute, «A cradle-to-Gate Life Cycle Assessment of Canadian Particleboard» Ottawa, ON, 2013.
- [48] Domtar inc, «Rapport d'analyse environnementale pour le projet d'augmentation de puissance de 18 MW de la centrale de cogénération de l'usine de Windsor» Windsor, 2016.
- [49] M. Lal, Life Cycle Assessment of Nordic Lam and Nordic X-Lam, Québec: FPIInnovations, 2018.
- [50] U. M. Hossain et N. S. Thomas, «Influence of waste materials on buildings' life cycle environmental impacts: Adopting resource recovery principle» *Resources, Conservation & Recycling*, vol. 142, n° 12019, pp. 10-23, 2019.

- [51] U. M. Hossain et P. C. Sun, «Comparative LCA of wood waste management strategies generated from building construction activities» *Journal of Cleaner Production*, vol. 177, pp. 387-397, 2018.
- [52] D. Durlinger, E. Crossin et J. Wong, «Life cycle assessment of environmental timber building» p. 112, 2013.
- [53] P. Bernier et D. Paré, «Using ecosystem CO₂ measurements to estimate the timing and magnitude of greenhouse gas mitigation potential of forest bioenergy» *Global Change biology: Bioenergy*, vol. 5, n° 12013, pp. 67-72, 2013.
- [54] Commission nationale de classification des sciages, *SPS 2 Norme de produits spéciaux pour le bois classé par machine*, Conseil d'accréditation des Normes canadiennes du bois.
- [55] R. Heijungs et M. A. J. Huijbregts, «A review of approaches to treat uncertainty in LCA» chez *iEMSs 2004 International Congress*, 2004.
- [56] MFFP, *Données de production exprimées en m³ des usines de panneaux à lamelles orientées et des usines de panneaux de particules*, Québec, Québec, 2019.
- [57] Cecobois, «Classification visuelle, règles de la NLGA. <https://cecobois.com/fr/classification-visuelle-regles-de-la-nlga>,» Juin 2018. [En ligne]. [Accès le Juin 2018].
- [58] Weidema. B.P., «Market information in life cycle assessment. In: Agency DEP, editor» 2003.

**ANNEXE I -
INVESTIGATION OF POTENTIAL EMISSIONS FROM THE COMBUSTION
OF CERTAIN MANUFACTURED WOOD PRODUCTS**



Natural Resources
Canada

Ressources naturelles
Canada



CanmetENERGY

Leadership in ecoInnovation

Investigation of Potential Emissions from the Combustion of Certain Manufactured Wood Products

Prepared for:
FPIinnovations

Prepared by:
Peter Gogolek, Research Scientist, Bioenergy/Industrial Innovation Group
Natural Resources Canada, CanmetENERGY

March, 2019



canmetenergy.nrcan.gc.ca

Canada

Disclaimer:

Neither Natural Resources Canada nor any of its employees makes any warranty express or implied, or assumes any legal liability or responsibility for the accuracy, completeness or usefulness of its contents. Reference in the report to any specific commercial product, process, service or organization does not necessarily constitute or imply endorsement, recommendation or favouring by Natural Resources Canada. The views and opinions of authors expressed in this report do not necessarily state or reflect those of Natural Resources Canada.

Partial funding for this work was provided by Natural Resources Canada through the Program of Energy Research and Development.

Cat. No. xxx-xxxxxxx-xxx

ISBN or ISSN xxx-x-xxx-xxxxx-x

© Her Majesty the Queen in Right of Canada, as represented by the Minister of Natural Resources, 2019

Acknowledgements

The author is grateful to the Characterization Laboratory for the expedited delivery of the results of the analysis of the samples.

Executive Summary

As part of its activities on best practices and life-cycle analysis, FPInnovations is investigating the potential emissions from the combustion of manufactured wood products. These include demolition wood, particleboard, glulam (glued laminated timber), and oriented strand board. This report is the first of two on the potential emissions from the combustion of the manufactured wood products. Here is presented the analyses of the materials as a fuel and the potential emissions based on these results.

The analysis of the six samples of manufactured wood products was performed for the basic combustion properties, ash composition, and halogen content. The emission factors for the major pollutants (carbon dioxide, sulphur dioxide, ash, nitric oxide) show that only the two particle board samples (with PF and pMDI) have a potential for significant emissions of nitric oxide, though the actual emissions should be much lower than the predictions based on the emission factors.

There are the necessary precursors, copper and chlorine, for the formation of dioxins and furans in the post-combustion gases for both the particle board and, to a lesser extent, the oriented strand board. However, the actual formation would depend on the combustion conditions, particularly the temperature history of the post-combustion gases in the flue gas handling system.

Table of Contents

Acknowledgements.....	i
Executive Summary.....	ii
1. Introduction	1
2. Analysis of the Samples.....	1
3. Discussion.....	4
4. Conclusion.....	5
5. Nomenclature	5
6. References.....	6

Tables and Figures

Table 1 - Proximate and Ultimate Analysis of the six sample of manufactured wood products provided by FPI.	2
Table 2 - Components of ash of the six sample of manufactured wood products provided by FPI.....	3
Table 3 - Halogens by Hydrolysis of the six sample of manufactured wood products provided by FPI.	3
Table 4 - Emission factors for the major pollutants on the basis of complete conversion.	4

1. Introduction

FPIInnovations is a not-for-profit world leader that specializes in the creation of innovative scientific solutions in support of the Canadian forest sector's global competitiveness and responds to the priority needs of its industry members and government partners. Among its activities, FPIInnovations conducts research into best management practices for environmental compatibility and resource management. The findings help member companies operate in a manner that is environmentally responsible and sustainable.

CANMETENERGY is the foremost bio-energy research laboratory in Canada. It conducts fundamental and bench-scale research, operated pilot-scale thermal conversion technologies for torrefaction, pyrolysis, gasification, and combustion. It has provided advice, problem solving, and evaluations for commercial biomass conversion technologies. The CANMETENERGY staff is aware of the current state-of-the-art in bio-energy and biomass conversion technologies.

As part of its activities on best practices and life-cycle analysis, FPIInnovations is investigating the potential emissions from the combustion of manufactured wood products. These include demolition wood, particle board, glulam (glued laminated timber), and oriented strand board. The manufactured wood products have different adhesives. The adhesive for glulam is PRF, Phenol Resorcinol Formaldehyde. The oriented strand board (OSB) has either PF (Phenol Formaldehyde) or pMDI (polymeric Methylene Diphenyl diisocyanate). The particle board is manufactured from recycled oriented strand board with either of the two adhesives. The two different types are distinguished by the source material.

This report is the first of two on the potential emissions from the combustion of the manufactured wood products. Here is presented the analyses of the materials as a fuel and the potential emissions based on these results. The second report examines the public scientific literature for data on emissions from combustion of similar materials.

2. Analysis of the Samples

Samples of the wood products were provided by FPI to CanmetENERGY. The demolition wood, Glulam, and particle board samples were comminuted prior to being given to the Characterization Laboratory. The fine ground samples of OSB from FPI were given directly to Characterization Laboratory with no processing.

Prior to analyses, the biomass feedstock was size reduced further to approximately 60 mesh by the Characterization Laboratory. The following methods were performed by

Characterization Laboratory: thermogravimetric analysis (TGA) as outlined by ASTM D7582, volatile content outlined by ISO 562, ultimate analysis as outlined by ASTM D5373, oxygen by difference and gross calorific value as outlined by ISO 1928. The results of the analyses are presented in Table 1.

Table 1 - Proximate and Ultimate Analysis of the six sample of manufactured wood products provided by FPI.

	Wood Chips ¹	Demo Wood	Glulam	OSB /PF	OSB /pMDI	PB(OSB /PF)	PB(OSB/pMDI)
Moisture (wt%)	0	2.17	2.12	0.64	1.50	1.94	1.40
Ash (wt%)	<1	0.59	0.47	0.93	0.44	1.02	0.49
Volatile (wt%)	76-86	84.30	83.08	78.76	80.39	77.69	79.05
Fixed Carbon (wt%)	14-24	15.11	16.45	20.31	19.18	21.29	20.47
Gross Calorific (db) (MJ/kg)	19.5-20.5	20.40	20.37	20.62	21.04	20.52	20.73
	Ultimate Analysis (wt %, dry basis)						
Carbon	47-52	51.1	50.7	51.1	52.1	50.3	50.7
Hydrogen	6.1-6.3	6.18	6.13	6.19	6.16	6.27	6.25
Oxygen	38-45	41.84	42.47	41.27	40.74	38.80	39.15
Nitrogen	0.09-0.17	0.17	0.16	0.41	0.51	3.64	3.35
Sulfur	0.007-0.03	0.10	0.08	0.07	0.08	<0.05	0.05

These samples all have low moisture and low ash content. The calorific value is typical of a dry woody biomass at approximately 20 MJ/kg. The analysis results for both Demolition Wood and Glulam are within the range for dry softwood wood chips in all the categories of the Proximate and Ultimate analyses [3].

The nitrogen and sulphur content in the ultimate analysis are the potential concerns for emissions from combustion. The sulphur content is very low for all samples. The nitrogen content is low for four of the samples, but quite high (>3%) for both particle board samples.

The ash was analysed by ASTM D4326, with slight modifications by the Characterization Laboratory. The results are presented in Table 2. The Loss on Fusion is the mass lost was the ash is heated. This is generally the decomposition of carbonates. The decomposition of sulphates is captures in the SO₃ result.

The major ash components are calcium, sodium and potassium, with significant amounts of silicon, iron, and magnesium. Of the minor metals, manganese is dominant. There are significant amounts of copper in all the samples except the demolition wood.

¹ These ranges are taken from [3] on a dry-basis.

The halogen content was measured using the hydrolysis method developed in-house. The results are presented in Table 3. Fluorine and bromine were below the detection limit. The chlorine content of the particle board is high. For the other samples, the chlorine level is comparable to typical woody biomass. Wood chips can be expected to have chlorine content in the range of 50 to 60 µg/g dry basis, wood bark in the range of 150 to 200 µg/g dry basis [3].

Table 2 - Components of ash of the six sample of manufactured wood products provided by FPI.

		Demo. Wood	Glulam	OSB /PF	OSB /pMDI	PB(OSB/PF)	PB(OSB/pMDI)
SiO ₂	wt%	6.54	6.99	4.44	7.63	4.49	6.57
Al ₂ O ₃	wt%	2.06	1.65	0.9	1.68	0.93	1.60
Fe ₂ O ₃	wt%	1.20	1.34	0.96	2.58	1.34	2.67
TiO ₂	wt%	0.31	0.66	0.32	0.66	0.30	0.55
P ₂ O ₅	wt%	0.31	0.52	0.26	0.53	0.35	0.52
CaO	wt%	33.40	29.52	14.29	29.83	13.10	24.70
MgO	wt%	4.92	5.56	3.07	5.91	2.88	4.87
SO ₃	wt%	13.10	2.44	1.52	2.63	5.68	9.73
Na ₂ O	wt%	1.63	12.20	32.7	12.55	33.70	17.60
K ₂ O	wt%	12.20	9.53	6.84	8.91	6.32	7.16
Barium	ppm	2173	2967	1328	2779	1281	2319
Strontium	ppm	1252	1155	544	1129	501	949
Vanadium	ppm	<50	<50	<50	<50	<50	<50
Nickel	ppm	114	67	<50	<50	51	105
Manganese	ppm	15090	26452	11756	22084	10944	18587
Chromium	ppm	319	944	913	1376	736	1020
Copper	ppm	207	1369	976	1489	869	1560
Zinc	ppm	2592	3052	1638	3258	1683	3019
Loss on Fusion	wt%	22.08	25.96	32.98	23.87	29.30	21.30
Sum	wt%	99.99	99.99	99.99	99.99	99.99	99.99

Table 3 - Halogens by hydrolysis of the six sample of manufactured wood products provided by FPI.

		Demolition Wood	Glulam	OSB /PF	OSB/pMDI	PB(OSB/PF)	PB(OSB/pMDI)
Chlorine	µg/g	64	66	130	110	740	830
Fluorine	µg/g	<10	<10	<10	<10	<10	<10
Bromine	µg/g	<10	<10	<10	<10	<10	<10

3. Discussion

The main pollutants to be considered are carbon dioxide, sulphur dioxide, nitric oxide, and ash. Since the materials would be burned for energy recovery, the emissions are expressed as an emission factor (EF) in terms of mass of the emissions normalized by the energy content of the fuel. These are calculated assuming complete conversion of the precursors (C, S, N) to the appropriate oxides. In the case of NO_x, this is expressed as NO₂ and assumes no thermal NO_x. The results are presented in Table 4.

Table 4 - Emission factors for the major pollutants on the basis of complete conversion.

		Demolition Wood	Glulam	OSB /PF	OSB /pMDI	PB(OSB/PF)	PB(OSB/ pMDI)
CO ₂ EF	kg/GJ	91.8	91.3	90.9	90.8	89.9	89.7
SO ₂ EF	kg/GJ	0.098	0.079	0.068	0.076	<0.05	0.048
Ash EF	kg/GJ	0.289	0.231	0.451	0.209	0.497	0.236
NO _x EF	kg/GJ	0.274	0.258	0.653	0.796	5.828	5.310

These calculated emission factors for CO₂, SO₂ and ash are all good approximations to the actual emission factors that would be observed from combustion experiments. The emission factors for NO_x have to be qualified.

In practice, when the fuel has high fuel-N, there are competing reactions in the gas phase. The oxidation of the nitrogenous species form the NO, while these same species act to reduce the NO to molecular nitrogen. So the observed emissions of NO_x are generally significantly lower than the emission factors assuming full conversion. This was shown for wood stoves [1] that the fraction of fuel nitrogen converted to NO_x decreased with increasing fuel nitrogen content. This was also shown at the larger scale for different solid biofuels burned in a 200 kW(th) grate furnace and in a 50 kW(th) bubbling fluidized-bed combustor [2]. The NO_x emission factors in Table 4 are high for the samples of particle board made from recycled OSB because these have high nitrogen content and total conversion is assumed. In practice, those emissions will be lower, but the actual emission factors would have to be determined by experiments.

Dioxins and furans can be formed in the post-combustion gases when hydrocarbons, chlorine and oxygen are present, with copper in the solid phase to act as a catalyst [3]. The temperature window for the synthesis reactions to occur is between 180 and 500°C [4]. Rapid cooling of the post-combustion gases can minimize the formation. Particle boards, made from either OSB, have the greatest potential to form dioxins and furans in improperly operated combustion systems, because they contain sufficient amount of both chlorine and copper. Oriented strand board (OSB) poses a lower risk. However, it

is worth repeating that the combustion conditions and particularly the handling of the post-combustion gases are crucial to prevent the formation of these compounds.

4. Conclusion

The analysis of the six samples of manufactured wood products was performed for the basic combustion properties, ash composition, and halogen content. The emission factors for the major pollutants (carbon dioxide, sulphur dioxide, ash, nitric oxide) show that only the two particle board samples (made from OSB with PF and with pMDI) have a potential for significant emissions of nitric oxide. Gas phase reduction reactions converting nitric oxide to molecular nitrogen would give actual emissions much lower than predicted from the emission factors calculated in Table 4.

There are the necessary precursors for the formation of dioxins and furans for both the particle board and, to a lesser extent, the oriented strand board. However, the actual formation would depend on the combustion conditions, particularly the handling of the post-combustion gases and the residence time in the temperature window between 180°C and 500°C.

5. Nomenclature

Acronyms	
EF	Emission Factor, the gaseous mass emissions assuming complete oxidation, on energy basis (kg/GJ)
OSB	Oriented Strand Board
PB	Particle Board manufactured recycle oriented strand board
PF	Phenol Formaldehyde adhesive for particle board and oriented strand board
pMDI	Polymeric Methylene Diphenyl diisocyanate adhesive for particle board and oriented strand board
PRF	Phenol Resorcinol Formaldehyde

6. References

- [1] Skreiberg, Ø., Hustad, J.E., Karlsvik, E. (1997) "Empirical Modelling and Experimental Results from Wood-Stove Combustion", in *Developments in Thermochemical Biomass Conversion*, Blackie Academic, pp. 1462-1476.
- [2] Wartha, C., Reisinger, K., Winter, F., Gogolek, P.E.G., Hofbauer, H., (1997) "The importance of NO formation characteristics for the prediction of NO-emissions from grate and fluidized bed combustors". In: M.G. Carvalho et al. (Eds.) *Proceedings Fourth International Conference on Technologies and Combustion for a Clean Environment*, Lisbon, Portugal, Section 16, pp. 15-21.
- [3] Van Loo, S., Koppejan, J. (Editors) (2002) "Handbook of Biomass Combustion and Co-Firing", Twente University Press.
- [4] Nussbaumer, T. (1998) *Furnace Design and Combustion Control to Reduce Emissions and Avoid Ash Slagging*, IEA, Biomass Combustion Activity, Final Report No. IEA Bioenergy: T13: Combustion: 1998:03.

Contact:

Peter E.G. Gogolek
Research Scientist
Industrial Innovation Group, Bioenergy
Natural Resources Canada, CanmetENERGY
peter.gogolek@canada.ca

About CanmetENERGY

Natural Resources Canada's CanmetENERGY is the Canadian leader in clean energy research and technology development. Our experts work in the fields of clean energy supply from fossil fuel and renewable sources, energy management and distribution systems, and advanced end-use technologies and processes. Ensuring that Canada is at the leading edge of clean energy technologies, we are improving the quality of life of Canadians by creating a sustainable resource advantage.

Head Office	Devon, Alberta	Ottawa, Ontario	Varennes, Quebec
580 Booth Street	1 Oil Patch Drive	1 Haanel Drive	1615 Lionel-Boulet Boulevard
Ottawa, ON	Devon, AB	Ottawa, ON	Varennes, QC
Canada	Canada	Canada	Canada
K1A 0E4	T9G 1A8	K1A 1M1	J3X 1S6



canmetenergy.nrcan.gc.ca

Canada

**ANNEXE II -
REVIEW OF THE LITERATURE RELEVANT TO EMISSIONS FROM THE
COMBUSTION OF CERTAIN MANUFACTURED WOOD PRODUCTS**



Natural Resources
Canada

Ressources naturelles
Canada



CanmetENERGY

Leadership in ecoInnovation

Review of the Literature Relevant to Emissions from the Combustion of Certain Manufactured Wood Products

Prepared for:
FPIinnovations

Prepared by:
P. Goglek, Research Scientist, BioEnergy/Industrial Innovation Group
Natural Resources Canada, CanmetENERGY

March 2019



canmetenergy.nrcan.gc.ca

Canada

Disclaimer:

Neither Natural Resources Canada nor any of its employees makes any warranty express or implied, or assumes any legal liability or responsibility for the accuracy, completeness or usefulness of its contents. Reference in the report to any specific commercial product, process, service or organization does not necessarily constitute or imply endorsement, recommendation or favouring by Natural Resources Canada. The views and opinions of authors expressed in this report do not necessarily state or reflect those of Natural Resources Canada.

Cat. No. xxx-xxxxxxx-xxx

ISBN or ISSN xxx-x-xxx-xxxxx-x

© Her Majesty the Queen in Right of Canada, as represented by the Minister of Natural Resources, 2019

Executive Summary

As part of its activities on best practices and life-cycle analysis, FPInnovations is investigating the potential emissions from the combustion of manufactured wood products: demolition wood, particleboard, glulam (glued laminated timber), and oriented strand board. This report examines the public scientific literature for data on emissions from combustion of similar materials.

The use of manufactured wood products to displace high-GHG emission building materials like steel and concrete can lead to significant reductions of GHGs for buildings as well as sequestering carbon. The end-of-life handling of the materials is poorly understood. The literature indicates that proper modern industrial-scale combustion technologies can control the emissions of major pollutants (CO, NO_x, SO₂) as well as the minor pollutants (N₂O, dioxins and furans) to below the regulated limits. However, these conclusions are inferences from the general data available in the scientific literature. Direct measurement data of actual emissions were not found in the literature nor directly performed here.

Table of Contents

Executive Summary.....	i
1. Introduction	1
2. Major Pollutants.....	1
2.1 Carbon Monoxide.....	2
2.2 NOx.....	2
2.3 Sulphur Dioxide	3
3. Minor Pollutants	3
3.1 Nitrous Oxide	3
3.2 Dioxins and Furans	4
4. Discussion.....	4
5. Conclusion.....	6
6. References.....	6

Nomenclature

Acronyms	
EF	Emission Factor, the gaseous mass emissions assuming complete oxidation, on energy basis (kg/GJ)
MSW	Municipal Solid Waste
OSB	Oriented Strand Board
PB	Particle Board manufactured recycle oriented strand board
PCDD	Polychlorinated dibenzo-p-dioxins or dioxins
PCDF	Polychlorinated dibenzo-p-furans or furans
PCP	PentaChloroPhenol, a wood preservative
PF	Phenol Formaldehyde adhesive for particle board and oriented strand board
pMDI	Polymeric Methylene Diphenyl diisocyanate adhesive for particle board and oriented strand board
PRF	Phenol Resorcinol Formaldehyde
TEQ	Toxic Equivalence, a group measure of the emissions of dioxins and furans

1. Introduction

As part of its activities on best practices and life-cycle analysis, FPInnovations is investigating the potential emissions from the combustion of manufactured wood products: demolition wood, particleboard, glulam (glued laminated timber), and oriented strand board.

CanmetENERGY has provided an analysis of the materials as a fuel and the potential emissions based on that analysis in the previous report [1]. This report examines the public scientific literature for data on emissions from combustion of similar materials.

2. Major Pollutants

The major pollutants are carbon monoxide, nitric oxide and sulphur dioxide. The dominant emission is carbon dioxide, a greenhouse gas. However, these emissions originate from biogenic carbon and are considered GHG-neutral as far as the national inventories are concerned. The guidance from the International Panel on Climate Change (IPCC) [2] notes that biomass fuel is a special case. It states that

In the reporting tables, emissions from combustion of biofuels are reported as information items but not included in the sectoral or national totals to avoid double counting.¹

Improper operation of combustion systems can produce smoke and significant unburned organic compounds. These are not considered here since we assume the technologies used will be properly designed and operated.

Particulate emissions are not considered here because these can be handled by post-combustion cleaning technologies (bag house, scrubber, electrostatic precipitator) [3]. The combustion chamber can sometimes be designed to retain a large portion of the ash entrained in the post-combustion gases [4]. Salts may be formed between the alkali metals (sodium and potassium) and chlorine in the flue gases. These may have corrosion implications for exposed metal surfaces such as steam tubes but not as emissions. A review of the chemical and physical properties of ash from biomass combustion, and issues around disposal can be found in the recent article [5].

¹ From Article 2.3.3.5 Treatment of Biomass in [2].

2.1 Carbon Monoxide

Carbon monoxide arises from the incomplete oxidation of the carbon-bearing volatiles or the char. These emissions are determined by the temperature profile, excess air level and mixing in the combustion chamber. All combustion equipment emit some level of carbon monoxide. The concentration of CO in the flue gas is a good indicator of combustion performance of a furnace [4], with higher emissions indicating poor performance.

For a given furnace, there is an excess air level that delivers the minimum CO possible [6]. Insufficient air exaggerates any deficiencies in mixing, so that the CO formed does not contact oxygen. As the air supply is increased beyond the optimal range, the temperature in the furnace decreases, reducing the rate of oxidation as well as shortening the residence time in the furnace.

Moisture in the biomass, particularly large variations in moisture content, can produce elevated CO emissions. This happens as the evaporation of the water lowers the furnace temperature, reducing the rate of oxidation of the CO. This is a bigger problem for grate furnaces. Ensuring sufficient residence time and mixing in the furnace can mitigate these fluctuations [7].

Halogens are known to interfere in the oxidation of carbon monoxide [4].

2.2 NO_x

NO_x refers to the two oxides of nitrogen NO and NO₂ that are considered together. The oxidation of fuel nitrogen is the primary source of nitric oxide for biomass combustion. The two other formation mechanisms are generally negligible for biomass systems. *Thermal NO_x* is generated from flame temperatures in excess of 1300°C [4], which are unlikely to occur in biomass furnaces. The *prompt NO_x* mechanism can occur in hydrocarbon-rich atmospheres where molecular nitrogen reacts with the CH radical to form HCN, that is subsequently oxidized to NO_x as for the volatile nitrogen. This mechanism is only significant in the absence of fuel nitrogen.

The oxidation of fuel-N to nitric oxide occurs both in the gas phase for nitrogenous volatile compounds and in the solid phase (char) for the bound nitrogen. Between 66% to 75% for the fuel nitrogen is released in the volatiles [7]. The solid phase nitrogen, there is the potential for both production of NO and its reduction on the high char surface area [8]. For high fuel-N found in some biomass, there are competing reactions in the gas phase. The oxidation of the nitrogenous species forms NO, while these same nitrogenous species act to reduce the NO to molecular nitrogen. It was shown for wood stoves [4] that the conversion of fuel nitrogen to NO_x decreased with increasing fuel nitrogen content. This was also shown at the larger scale for different solid biofuels, including high-nitrogen plywoods, burned in a 200 kW(th) grate furnace and in a 50 kW(th) bubbling fluidized-bed combustor [9]. Because of the high volatile content and the high nitrogen content in the volatiles, there is a negative correlation between carbon monoxide emissions and NO_x emissions. Poor combustion of the volatiles gives

elevated CO emissions. This also promotes the NO_x reduction reactions leading to lowered NO_x emissions.

These observations apply to biomass furnaces without air-staging, the division of the combustion air among two or more levels in a furnace. Air-staging is a common technique to decrease NO_x emissions. The division of the air increases to opportunity for reduction reactions to occur in the furnace zone with only primary air. The addition of secondary (even tertiary) air completes the combustion process for the remaining volatile species and carbon monoxide [4, 8]. However, it is necessary to ensure that the secondary air can mix effectively and that there is sufficient residence time for the oxidation to be completed.

2.3 Sulphur Dioxide

The sulphur contained in the wood products primarily oxidises to SO₂. There may be very small amounts (<5% of total sulphur emissions) formed if the combustor is operated at lower temperatures [4]. However, not all of the sulphur will be oxidised. Some will remain in the ash, as was shown in the ash analysis for the materials [3]. A survey of sulphur emissions from nine biomass furnaces in Denmark [10] found that 55% to 65% of the sulphur was emitted as SO₂ with the balance retained in the ashes. These furnaces fired a variety of biofuels, including straw, wood chips, and wood pellets.

3. Minor Pollutants

While the major pollutants are emitted in double digit ppm concentrations or higher, the minor pollutants are emitted in single digit ppm concentrations or lower. This does not mean they are of less importance. Nitrous oxide is a greenhouse gas with the GWP over 200 times that of carbon dioxide. Dioxins and furans are highly toxic compounds that can also be strongly carcinogenic or mutagenic.

3.1 Nitrous Oxide

Nitrous oxide (N₂O) can be emitted from biomass combustion systems, particularly at the lower end of the operating temperature range. It is formed by the partial reduction of NO by nitrogenous species in the gas phase (volatile plume) or bound nitrogen in the char [4, 8, 11]. Modelling of NO and N₂O chemistry for biomass combustion [12] found that nitrous oxide emissions were below 5 ppm-v for all operating conditions modelled.

3.2 Dioxins and Furans

Dioxins and furans can be formed in the post-combustion gases when hydrocarbons, chlorine and oxygen are present, with copper in the solid phase to act as a catalyst. The temperature window for the synthesis reactions to occur is between 180°C and 500°C. Rapid cooling of the post-combustion gases can minimize the formation [4].

The collective concentrations of PCDDs and PCDFs are expressed by assigning toxic equivalent factors (TEQ). These allow the concentrations to be weighted against the most toxic dioxin 2,3,7,8-TCDD.

Chagger et al. [13] report the TEQs for emissions of dioxins and furans for wood waste, straw, MSW, and sewage sludge. The TEQ for dioxins were 6.9 ng/kg feed for wood waste, 35.0 ng/kg for straw, 46.4 ng/kg for MSW, and 6.2 ng/kg for sewage sludge. The TEQ for furans were 12.4 ng/kg feed for wood waste, 80.5 ng/kg for straw, 196 ng/kg for MSW, and 13.8 ng/kg for sewage sludge. Of the dioxins and furans measured, 60% to 100% was in the flue gas. The balance (0% to 40%) was in the “grit ash” (particulate matter in the flue gas), most likely deposited from the flue gas.

Wood combustion is reported as one of the most important emission sources for dioxins in the European Emission Inventory. However, the majority of these emissions is from residential burning, accidental fires, forest fires, and combustion and land filling of pentachlorophenol (PCP) treated wood. Data reported in literature indicates that emissions from controlled units equipped with efficient dust cleaning devices burning biomass are well within the legal limits [14].

Addition of sulphur to the combustion system has been found to interfere with the synthesis reaction. A study [15] of persistent organic pollutants (POPs) from the combustion of waste wood found that a S:Cl ratio of 6, by the addition of $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, was needed to achieve significant reductions in the WHO-TEQ value and the PCDD and PCDF contents of the flue gas. However, this produced elevated levels of CO, SO₂, and NH₃.

4. Discussion

The literature provides some general guidance as to the emissions of pollutants that can be expected from the combustion of manufactured wood products. There does not appear to have been direct testing of the materials under consideration, except for the demolition wood.

The emissions of the major pollutants, carbon monoxide and nitric oxide, can be reduced by:

- Maintaining a high furnace temperature, good mixing and long residence time to complete the oxidation reaction;

- Use air staging to control the NO for high-nitrogen fuels.

An additional benefit of air staging is that it can reduce the entrainment of particulate matter (char and ash), reducing the load on the gas handling system.

The emissions of SO₂ from the combustion of the manufactured wood products can be estimated in a straightforward manner. The calculated emission factors in [1] give the maximum possible emissions based on complete oxidation of the sulphur. The actual conversion will be less than 65% of that, as shown in section 2.3 above. Therefore, multiplying those emission factors by 0.65 will give an accurate but still conservative estimate of the SO₂ emissions.

Particle board, with both adhesives, have the greatest potential to form dioxins and furans in improperly operated combustion systems, because of the chlorine and copper content. Oriented strand board (OSB) poses a lower risk but still should be handled appropriately. The mitigation strategies to control dioxin and furan emissions are:

- Minimize the residence time of the flue gases in the temperature range 180°C to 500°C, in which these pollutants are synthesized.
- Use appropriate particulate removal technologies (electrostatic precipitators (ESP), baghouse) to remove particulate matter from the flue gas.

Nitrous oxide may be generated but only in single digit ppm-v concentrations.

The actual combustion conditions in which the manufactured wood products would be fired is likely to be a mixture of different wood products, a combination of the ones analysed in the first report [1], as well as forest wood. The combustion of the resulting mixture and the resulting emissions will depend on the relative proportions of the materials in the feed mixture.

First consideration will be the amount of forest wood included. This generally has higher moisture content than the waste wood products, usually greater than 20% and generally between 30% and 40%. This increased moisture will be a heat sink and require better control to maintain complete combustion of gaseous organic species and especially carbon monoxide.

The decrease in the amount of fuel-nitrogen will produce a decrease in the NO_x emissions. However, as the fuel-nitrogen decreases the effect of the competition between oxidation and reduction reactions decreases and the emissions tend towards complete conversion of fuel-N to NO_x.

The most important effect will be the dilution of the chlorine content in the fuel mixture. If the OSB is less than half the mixture and PB is less than 10% of the mixture then the chlorine content will be close to that of clear wood. This means that the emissions of dioxins and furans will be below the limits even without special handling of the flue gases. This is particularly important since it would allow heat recovery from the flue gases.

5. Conclusion

The use of manufactured wood products to displace high-GHG emission building materials like steel and concrete can lead to significant reductions of GHGs for buildings as well as sequestering carbon [15]. The end-of-life handling of the materials is poorly understood. The literature indicates that proper modern industrial-scale combustion technologies can control the emissions of major pollutants (CO, NO_x, SO₂) as well as the minor pollutants (N₂O, dioxins and furans) to below the regulated limits.

However, these conclusions are inferences from the general data available in the scientific literature. Direct measurement data of actual emissions were not found in the literature nor were the necessary experiments performed here.

6. References

- [1] Gogolek, P. (2019) "Investigation of Potential Emissions from the Combustion of Certain Manufactured Wood Products", CanmetENERGY Report to FPInnovations.
- [2] IPCC (2006) "2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories".
- [3] Ghafghazi, S., T. Sowlati, S. Sokhansanj, X. Bi, S. Melin (2011) "Particulate matter emissions from combustion of wood in district heating applications", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, V. 15, pp. 3019-3028.
- [4] Van Loo, S., Koppejan, J. (Editors) (2002) "Handbook of Biomass Combustion and Co-Firing", Twente University Press.
- [5] Nunes, L.J.R., J.C.O. Matias, J.P.S. Catalao (2016) "Biomass combustion systems: A review on the physical and chemical properties of the ashes", *Renewable and Sustainable Energy Reviews* v. 53, pp. 235–242.
- [6] Nussbaumer, T. (2003) "Combustion and co-combustion of biomass: fundamentals, technologies and primary measures for emissions reduction", *Energy and Fuel*, V. 17, pp. 1510-1521.
- [7] Khan, A.A., W. de Jong, P.J. Jansens, H. Spliethoff (2009) "Biomass combustion in fluidized bed boilers: Potential problems and remedies", *Fuel Processing Technology* v. 90, pp. 21-50.

- [8] Williams, A., Jones, J.M., Ma, L., Pourkashanian, M. (2012) "Pollutants from the combustion of solid biomass fuels", *Progress in Energy and Combustion Science*, V. 38, pp. 113-137.
- [9] Wartha, C., Reisinger, K., Winter, F., Gogolek, P.E.G., Hofbauer, H., (1997) "The importance of NO formation characteristics for the prediction of NO-emissions from grate and fluidized bed combustors". In: M.G. Carvalho et al. (Eds.) *Proceedings Fourth International Conference on Technologies and Combustion for a Clean Environment*, Lisbon, Portugal, Section 16, pp. 15-21.
- [10] Houmøller, S. and Evald, A. (1999) "Sulphur Balances for Biofuel Combustion Systems", 4th Biomass Conference of the Americas.
- [11] Winter, F., C. Wartha, H. Hofbauer, E. J. Anthony, F. Preto and P. E. G. Gogolek (1996) "Fundamental Testing of Radical Mechanisms in Nitrous Oxide Chemistry in CFBC", 5th Int. Conf. on Circulating Fluidized Beds, Beijing, China, pp. 333-337.
- [12] H. Liu, B. Gibbs (2002) "Modelling of NO and N₂O emissions from biomass fired circulating fluidized bed combustors", *Fuel*, V. 81, pp. 271-280.
- [13] Chagger, H.K., A. Kendall, A. McDonald, M. Pourkashanian, A. Williams (1998) "Formation of dioxins and other semi-volatile organic compounds in biomass combustion", *Applied Energy*, v. 60, pp. 101-114.
- [14] Lundin, L., Jansson, S. (2014) "The effects of fuel composition and ammonium sulfate addition on PCDD, PCDF, PCN and PCB concentrations during the combustion of biomass and paper production residuals", *Chemosphere*, V. 94, pp. 20-26.
- [15] Bowers, T., M.E. Puettmann, I. Ganguly, I. Eastin (2017) "Cradle-to-Gate Life-Cycle Impact Analysis of Glued-Laminated (Glulam) Timber: Environmental Impacts from Glulam Produced in the US Pacific Northwest and Southeast", *Forest Products Journal*, V. 67, pp. 368-380.

Contact:

Peter E.G. Gogolek
Research Scientist
Industrial Innovation Group, Bioenergy
Natural Resources Canada, CanmetENERGY
peter.gogolek@canada.ca

About CanmetENERGY

Natural Resources Canada's CanmetENERGY is the Canadian leader in clean energy research and technology development. Our experts work in the fields of clean energy supply from fossil fuel and renewable sources, energy management and distribution systems, and advanced end-use technologies and processes. Ensuring that Canada is at the leading edge of clean energy technologies, we are improving the quality of life of Canadians by creating a sustainable resource advantage.

Head Office	Devon, Alberta	Ottawa, Ontario	Varennes, Quebec
580 Booth Street	1 Oil Patch Drive	1 Haanel Drive	1615 Lionel-Boulet Boulevard
Ottawa, ON	Devon, AB	Ottawa, ON	Varennes, QC
Canada	Canada	Canada	Canada
K1A 0E4	T9G 1A8	K1A 1M1	J3X 1S6



canmetenergy.nrcan.gc.ca

Canada

**ANNEXE III -
CRD WOOD RECYCLING IN QUEBEC
BUSINESS OPPORTUNITIES REVIEW**

CRD Wood Recycling in Quebec

Business Opportunities Review

April 1, 2019 - Revised

Jonathan Lethbridge - FPI Business Development

Overview

The industry review below attempts to provide a high level overview of the construction, renovation and demolition (CRD) industry in Quebec.

We assume that recycled wood represents an important but small contributor to the fibre furnish of any one particular end-user. This is mainly because volumes of recycled wood materials generated at sorting centers will be very small relative to the total volume of wood needed by panel mills or cogen facilities.

CRD Waste in Quebec

In Quebec, CRD solid waste is recycled within two major collections systems: privately run sorting centers (centre Tri) and provincially supported eco-centres, which are typically managed by municipal governments.

During 2015, roughly 1.85 million tonnes CRD solid waste was received by the 50 or so, sorting centers in Quebec. Approximately 77% of the material sorted was either recycled or found alternative uses.

The province's 260 municipal eco-centers received roughly 405,000 tonnes of total residual material. Roughly 75% of this was CRD material, however, wood represented just 7% of total tonnage received or 28,000 tonnes. Given this low tonnage and the distributed nature of the collection centers, the wood at eco-centers is less interesting as a whole, but local supply could be aggregated for use at commercial/industrial operations.

CRD Wood Fibre Supply

In 2015, the basket of materials received at CRD recycling facilities comprised the following materials, in order of tonnage:

- Wood (56%)
- Concrete (22%)
- Metal (7%)
- Asphalt (4%)
- Packaging board (1%)
- Gypsum (1%) , and

- Other (9%)

As noted above, the majority of this recovered material was wood. In 2015, it was estimated that the 56% of wood fibre was equivalent to 800,000 tonnes of recovered sorted material. Breaking this down further in terms of end-use, roughly 63% of the wood or 530,000 tonnes was used as energy, while the balance, 37%, or 270,000 tonnes was used as a material in panel or particleboard production.

Based on an average dry density of 450kg/m³, this suggests roughly 1,778,000 m³ of wood was potentially available from the sorting centers across the province. If this was fully available as solid wood it would be equivalent to 753,000 Mfbm of lumber.

The distribution of recycled CRD material is not equal across the province and is concentrated most in heavily populated areas. Figure 1, ranks the regions in the province of Quebec with the highest tonnage of CRD waste. In 2009, Recyc-Quebec estimated that the largest sorting centers received 140,000 tonnes of material, while the smallest received less than half a tonne.

Region Administrative	Production	Taux Recuperation	Tonnes Recuperees
Capitale-Nationale	200,000	80%	160,000
Montréal	400,000	35%	140,000
Montérégie	275,000	25%	68,750
Mauricie	60,000	100%	60,000
Laval	130,000	45%	58,500
Estrie	70,000	60%	42,000
Outaouais	90,000	45%	40,500
Centre-du-Québec	50,000	60%	30,000
Bas-Saint-Laurent	35,000	65%	22,750
Chaudière-Appalaches	90,000	25%	22,500
Laurentides	200,000	9%	18,000
Saguenay-Lac-Saint-Jean	80,000	20%	16,000
Abitibi-Témiscamingue	30,000	50%	15,000
Lanaudière	130,000	5%	6,500
Nord-du-Québec	35,000	18%	6,300
Côte-Nord	15,000	20%	3,000
Gaspésie-Îles-de-la-Madeleine	15,000	10%	1,500

Figure 1. CRD Production in Quebec, By Region, 2008

The proportion of wood received at sorting centers also varied considerably across the province. Wood typically represents less than 30% of CRD material received for almost half of the sorting centers. However, for a few of the sorting centers wood is over 50%, while for the balance of centers wood represents between 30%-50% of the material processed.

If we assume that the largest sorting centers process the largest volumes of wood material, we can assume that there will be a few centers in the province processing over 70,000 tonnes of wood (140,000 x 50%); however, a more typical large volume sorting center may

process closer to 100,000 tonnes of CRD waste with 35% wood content, generating 35,000 tonnes of wood material for recycling. It's reasonable to surmise that the highest potential sorting facilities will lie somewhere within this range (35,000-70,000+ tonnes).

In order to better reflect the future potential supply of CRD wood fibre, we have extrapolated current CRD generation factors into a model incorporating targeted recycling levels (see Figure 2). We have extrapolated this further by using a forward looking estimate of housing stock in 2045. Specifically, the amount of CRD generated is estimated based on a function of the single family housing stock in the province of Quebec, adjusted for housing completions and demolitions.

Based on these estimates we expect the tonnage of CRD waste valorized could increase from 870,000 tonnes/year to 1.3 million tonnes/year, if our target assumptions are successfully met. This could increase to nearly 1.6 million if Quebec's single-family housing stock continues to grow at the same pace it has done over the past 20 years.

	2015	Targets	2045
Total CRD Generation	2,588,811	2,588,811	3,179,043
<i>CRD Generation per SD Housing Unit (tonnes/unit)</i>	1.62	1.62	1.62
Total CRD Recovered	1,851,000	2,071,049	2,543,234
<i>CRD Recovered as % total generation</i>	72%	80%	80%
Total CRD Processed	901,100	1,346,182	1,653,102
<i>CRD Processed as % total recovered</i>	49%	65%	65%
Total CRD Valorized	870,463	1,300,412	1,596,897
<i>CRD Valorized as % total CRD Processed</i>	97%	97%	97%

Figure 2. CRD Potential Based on Targeted Levels and Single Family Housing Growth

By applying current rates of wood recovery from CRD waste along with current end-use factors, we have developed a theoretic supply model for CRD wood fibre (see Figure 3).

Based on this analysis, we estimate that assuming current CRD recovery, if all targets are met the CRD recycling industry could produce just over 800,000 tonnes of CRD wood fibre annually. This amount could grow to just under 1 million tonnes by 2045, if single family housing growth continues at current rates. We have also made some liberal assumptions about how the wood is allocated between end-uses, which we incorporate into our supply demand analysis (i.e. 70/30 split between materials and energy end-uses, etc).

	2015	Targets	2045
Recovered CRD wood processed	503,715	807,709	991,861
<i>As % total CRD processed</i>	56%	60%	60%
Recovered wood valorized	501,446	804,071	987,393
<i>As % wood waste processed</i>	100%	100%	100%
End-Uses:			
Wood recycled for materials	187,191	484,625	694,303
Wood recovered for incineration	314,255	319,445	293,091
Wood waste refuse	2,269	3,638	4,468
<i>Wood for materials as % total wood waste processed</i>	37%	60%	70%
<i>Wood for incineration as % total wood waste processed</i>	62%	40%	30%
<i>Wood refuse as % total wood waste processed</i>	0.5%	0.5%	0.5%
Materials Markets:			
Recovered Solid Wood	37,438	96,925	173,576
<i>Mfbm equivalent</i>	37,774	97,794	175,132
Recovered Chips	149,753	387,700	520,727
<i>Solid wood as % proportion of wood materials</i>	20%	20%	25%
<i>Chips as % proportion of wood materials</i>	80%	80%	75%

Figure 3. CRD Wood Fibre Supply Potential, Tonnes

CRD Wood Fibre Demand

Existing primary markets for recycled wood fibre in Quebec include: energy cogeneration fuel and wood chips for panel, pulp, and paper production. In terms of end-product demand for wood, Recyc-Quebec previously reported that just over 80% of the wood is chipped before leaving the center, while 20% is sold as solid wood.

Other existing and potential markets for recycled wood fibre include:

- Horticulture mulch
- Litter material for animals
- Material for terrified or standard wood pellets
- Composting and soil amendment
- Fibre for composite materials
- Industrial absorbents
- Surfaces for playgrounds, equestrian grounds or footpaths
- Highway/road hydrology management
- Wood fiber insulating materials
- Foundations of forest roads
- Base of alpine ski slopes

During 2010, it was estimated potential demand from mills utilising recycled wood was 950,000 tonnes, which was almost three times the amount supplied by Quebec wood recycling industry. Given the shortfall, the balance of material beyond Quebec's domestic recycled tonnage was supplied by virgin fibre within the province and imports from U.S. sawmills.

Below we provide a closer look at Quebec’s potential key industrial users of recycled wood fibre.

The major wood panel mills in Quebec are listed in Figure 4, panel demand makes up the second largest market for recycled wood fibre in the province. In total, the mills listed below represent a capacity of 3.8 million cubic meters of finished product panel demand. This level of capacity requires roughly 2.3 million tonnes of wood fibre.

Mill	Owner	Capacity (m3)	City	Region	Products
Sayabec	Uniboard	650,000	Sayabec	Bas-Saint-Laurent	Particleboard, laminated particleboard and laminated MDF
Tafisa	Groupe Sonae Industria	910,000	Lac-Mégantic	Estrie	Particleboard, decorative panels
Val-d'Or	Uniboard	400,000	Val-d'Or	Abitibi-Témiscamingue	Particleboard, laminated particleboard and laminated MDF
Sacopan*	Boisaco	125,125	Sacré-Coeur	Côte-Nord	Interior doors
Mont-Laurier	Uniboard	150,000	Mont-Laurier	Laurentides	MDF, HDF
Maniwaki OSB	LP	575,000	Bois-Franc	Outaouais	OSB**
Amos	Forex	410,000	Amos	Abitibi-Témiscamingue	OSB**
LaSarre	Norbord	331,875	La Sarre	Abitibi-Témiscamingue	OSB**
Saint-Georges-de-Champlain	Produits Forestiers Arbec	221,000	Shawinigan	Mauricie	OSB**
Total		3,773,000			

* Capacity is estimated

** OSB is converted from a Msf 3/8" basis

Figure 4. Wood Panel Production Facilities in Quebec

Below we have conducted a similar calculation for the wood-based biomass cogen facilities currently operating in Quebec. These facilities are listed in Figure 5. Based on an operating rate of 61% (the approximate operating rate of all biomass power facilities in Quebec in 2018), we estimate these plants could consume up to 1.4 million tonnes of wood biomass.

Facility	Owner	Capacity (MWe)	City	Region
Hôpital de Mont-Joli	Municipality	2	Mont-Joli	Bas Saint-Laurent
St-Félicien Cogénération (SFC)	Greenleaf Power	23	St-Félicien	Saguenay-Lac Saint-Jean
Dolbeau-Mistassini	Resolute FP	29	Dolbeau	Saguenay-Lac Saint-Jean
Saint-Félicien	Resolute FP	43	St-Félicien	Saguenay-Lac Saint-Jean
Saint-Félicien	La Ville de Saint Félicien	25	St-Félicien	Saguenay-Lac Saint-Jean
Brompton Biomass Cogen.	Kruger Energy	27	Sherbrooke	Estrie
Domtar-Windsor	Domtar	48	Windsor	Estrie
Gatineau	Resolute FP	17	Gatineau	Outaouais
Thurso Cogeneration Plant	Fortress Specialty Cellulose	24	Thurso	Outaouais
Senneterre	Boralex	31	Senneterre	Abitibi-Témiscamingue
Témiscaming mill	Rayonier Advanced Materials	60	Témiscaming	Abitibi-Témiscamingue
Chapais Énergie	Chapais Énergie, s.e.c.	31	Chapais	Nord-du-Québec
Total		359		

Figure 5. Key Wood-based Biomass Power Facilities in Quebec

We can more realistically assess the total potential tonnage demanded by looking at various substitution rates by end-user. In Figure 6 below, we present the amount of wood fibre tonnage required by various industrial end-users assuming different operating rates, ranging

from 1% to 20%. We expect that some cogen facilities already use CRD wood fibre at levels above this range; however, these figures represent province wide adoption rates by the individual sectors.

If all categories of end-users were to include CRD wood fibre at a rate of 20%, potential demand would almost reach 1 million tonnes per year, according to our estimates.

	Rate of Substitution				
	1%	5%	10%	15%	20%
CLT/Glulam	266	1,329	2,657	3,986	5,314
OSB	9,484	47,421	94,842	142,264	189,685
Total solid wood	9,750	48,750	97,499	146,249	194,999
Panels					
Particle Board	15,013	75,065	150,129	225,194	300,258
MDF	1,056	5,280	10,560	15,840	21,120
Total Panel Demand	16,069	80,345	160,689	241,034	321,378
Cogen	21,318	106,592	213,183	319,775	426,367
Total	47,137	235,686	471,372	707,058	942,744

Figure 6. Potential Industrial CRD Wood Demand (at full capacity), By Substitution Rate, Tonnes

In order to provide a basis of comparison between the supply of CRD wood fibre and the potential demand from key end-users, we have compared the levels of supply as noted in Figures 2 and 3 against the potential demand. As shown in Figure 7, as of 2015, the tonnage of CRD wood fibre available represents roughly 11% of all fibre used by the key potential industrial end-users in Quebec. The demand potential calculation below also includes OSB and mass timber (CLT and glulam) facilities using solid wood. However, we estimate that no CRD wood is currently used by these facilities.

	2015	Targeted	Future - 2045
Solid wood for mass timber & OSB	0.0%	0.0%	17.8%
Chips for Panels	11.6%	30.2%	32.4%
Chips for Cogen	14.7%	15.0%	13.7%
Average across total demand at capacity	10.6%	17.1%	17.3%

Figure 7. Supply as % of Current Capacity

Sorting Centre Economics

In order for CRD waste diversion initiatives to find success, the economics of material recovery must be attractive enough to generate reasonable returns for industry players engaged in recycling activities. There are three main factors driving operating economics:

- Waste material supply
- End-product demand
- Recycling conversion costs

On the waste materials supply side, sorting centers must be able to attract sufficient volumes on an on-going basis to support the scale of their operation. This means essentially that waste generators must be incentivized to bring their material to recycling centers rather than the municipal dumps. Factors driving these incentives include:

- Annual volume limitations at municipal dumps; and limitations on specific materials;
- Adequate relative pricing differentials between tipping fees charged at the municipal dump and fees charged at the sort centers.

Fundamentally, the maximum price sorting centers can demand from companies seeking waste disposal services has a ceiling value. This is represented by the tipping fees charged by nearby local dumps plus associated user taxes.

Relative cost position of Centre Tri	Cost \$
Local LET tipping fees	60.00
Redevance tax	23.07
Total tipping cost	83.07
Centre tri tipping fee (General CRD)	79.50
Net Cost advantage of Centre Tri (general CRD)	3.57

Figure 8. Centre Tri Pricing Limitation for CRD Fibre

Given wood is the largest volume driver of these operations, the economics of wood recovery is an important factor in determining the success of these operations. Importantly they will need to produce a product that can be delivered to traditional forest product mills at a price competitive with virgin fibre. The recycling plants will benefit from a negative cost of feedstock, but transportation and converting costs have a major impact on their economics.

Conversion costs at sorting centers vary mainly a function of facility age and level of automation. In Quebec there are three general classes of sorting centers. As shown in Figure 9, the first generation plants rely heavily on manual sorting and therefore have higher labour costs, but lower capital costs. The output of merchantable recycled waste material is also less given the low recycling rates at these facilities. This mean these sites must spend more to dispose of non-merchantable waste than facilities with higher recovery rates.

Second and third generation facilities are successively more automated. This means less labour is required, but higher capital, maintenance, and energy costs exist. However, these plants can recover more merchantable waste and tend to process larger volumes relative to the manual facilities.

	1st Generation	2nd Generation	3rd Generation
Type	Manual	Early mechanical	Fine mechanical
Launched		1990's	2007
Special equipment		Wood chipper	Wood chipper
Typical recycling rate	30%	60%-80%	65%-85%
Facility footprint (sq.ft.)	20,000	30,000-300,000	300,000
Construction costs	\$250,000-1,000,000	\$1 - 3 Million	\$6 - 10 Million
Fees Charged	Similar to municipal dump	\$40-\$50/tonne	\$50-\$60/tonne

Figure 9. Classes of Sorting Centers in Quebec, 2009

CRD facilities located closer to industrial end users will always hold a cost advantage over competing CRD suppliers located further from sources their customers. In Quebec, as elsewhere, the largest sources of CRD wood fibre are located in proximity to the largest regional and metropolitan population densities. On the other hand, forest product mills are typically located much farther from these areas.

In Figures 10 and 11 we have mapped out some key recycling centers, as well key potential CRD wood fibre users. What is evident from the maps is that only a portion of the large industrial end-users are located within an economically viable proximity to most of the CRD tonnage at source.

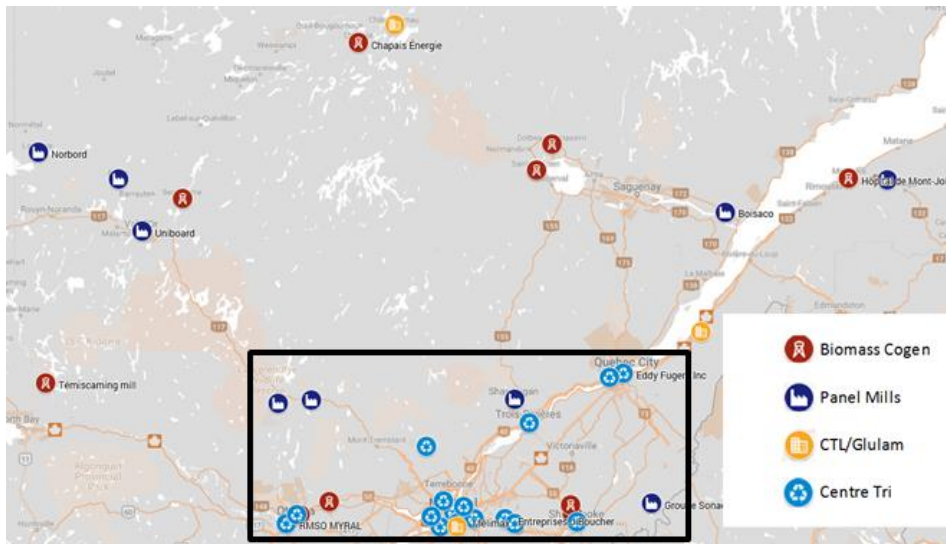


Figure 10. CRD Wood Fibre Sources of Supply and Demand

In Figure 11, we have focused in on the facilities located nearest to the CRD sorting centers. In order to quantify the impact of transportation, we have selected a number of the sites in this area and conducted a transportation cost analysis.

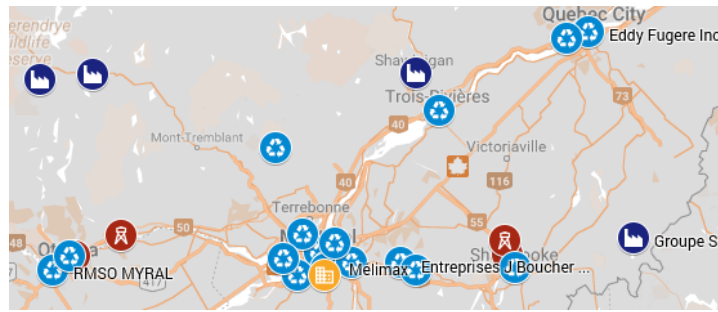


Figure 11. CRD Wood Fibre Sources of Supply and Demand - Metro

The results of our transportation cost analysis are shown in Figure 12. We assessed the following five scenarios:

- Scenario 1: Montreal to Panel End-users
- Scenario 2: Montreal to Cogen End-users
- Scenario 3: Gatineau to Panel End-users
- Scenario 4: Quebec City/Trois-Riviere to Panel End-users
- Scenario 5: Quebec City/Trois-Riviere to Cogen End-users

The key take-away from our calculations is the fact that even within the confines of the more proximal mill locations; transport costs represent a material limiting factor when assessing CRD economics. We would specifically note that once the transportation distance is above 250 km, it becomes severely limiting from a cost perspective.

Departure City	Destination	End-use Scenario	Calculated			Total Time Hours	\$ / Trip	\$ / tonne
			Distance from Plant KM	Driving Time Hours	Total Time Hours			
Multi Récupération, Laval	Arbec, Shawinigan	Panels	1	177	2.0	4.0	241.94	8.78
Multi Récupération, Laval	Tafisa, Lac-Mégantic	Panels	1	281	3.1	5.1	384.09	13.94
Multi Récupération, Laval	Uniboard, Mont-Laurier	Panels	1	215	2.4	4.4	293.88	10.66
Multi Récupération, Laval	Domtar Windsor	Cogen	2	172	1.9	3.9	235.10	8.53
Multi Récupération, Laval	Kruger Brompton	Cogen	2	180	2.0	4.0	246.04	8.93
Malex, Gatineau	Uniboard, Mont-Laurier	Panels	3	173	1.9	3.9	236.47	8.58
Bellemare Environment, Trois Rivières	Arbec, Shawinigan	Panels	4	39	0.4	2.4	53.31	1.93
Bellemare Environment, Trois Rivières	Tafisa, Lac-Mégantic	Panels	4	195	2.2	4.2	266.54	9.67
Bellemare Environment, Trois Rivières	Domtar Windsor	Cogen	5	134	1.5	3.5	183.16	6.65
Bellemare Environment, Trois Rivières	Kruger Brompton	Cogen	5	140	1.6	3.6	191.36	6.94
Bellemare Environment, Trois Rivières	Resolute Saint Felicien	Cogen	5	336	3.7	5.7	459.27	16.67

Figure 12. CRD Fibre Transportation Costs

In terms of CRD wood fibre end-product prices, there are three recognized grades of recycled wood:

- Grade 1: Excludes all contaminated wood and contains only the cleanest recycled wood. This grade typically represents a small proportion of total recycled wood production.

- Grade 2: Can include Grade 1 wood and other wood of slightly lower quality with very little contaminants. This grade typically represents the largest volumes at recycled wood facilities (up to 70%).
- Grade 3: Can include higher quality wood, as well as heavily contaminated wood. There is little demand for this grade of recycled wood.

In Quebec, it's been reported that mills using recycled fibre required as much as 300,000 tonnes of Grade 1 and 650,000 tonnes of Grade 2 recycled wood material.

Existing end-use production facilities will almost certainly utilize recycled wood waste comingled with virgin wood. This means the quality of the material will need to meet very high standards in order to not impede production or negatively impact product quality. Therefore, quality control management is crucial to the success of these sorting facilities. The processing of poor quality material will likely increase conversion costs and can negatively impact product output quality.

Other important cost factors are land costs, location and seasonality. Large facilities are typically needed near urban areas and require a large operating area, both factors drive up land costs. In addition, these facilities must store significant volumes of incoming waste and outgoing merchantable material. Seasonality is a particular issue for CRD waste given that significant volumes of waste material arrive at sorting centers in the spring and early summer as construction crews prepare existing sites for new construction.

Economics of Cascading Recycled Wood Fibre

The premise behind FPI's technology initiative is to recycle the same wood fibre multiple times across several construction/demolition cycles. This will maximize the useful value of wood and minimize landfilling waste.

Figure 13 demonstrates the cascade of recycling yields that are expected to result from implementation of this approach. Because all the production by-products at each stage are directed at particleboard, the theoretical yield for this product is 94%. This is higher than the yields for glulam and OSB of 68% and 48% respectively. (See Figure 14). However, in reality the yields below will never be reached due losses through the processing and recovery cycles.

Cascade 1	% Input	Cascade 2	% Input	Cascade 3	% Input	Cascade 4	% Input	
CRD Lumber	----->	Glulam	----->	OSB	----->	Particleboard	----->	Energy
	68%		70%		88%		100%	
	----->	OSB	----->	Particleboard	----->	Energy		
	0%		30%		12%			
	----->	Particleboard	----->	Energy	----->	Landfill		
	32%		0%		0%			
	----->	Energy	----->	Landfill				
	0%		0%					
	----->	Landfill						
	0%							

Figure 13. CRD Wood Fibre Cascading Product Fibre Yields - Detail

% of CRD Lumber Input	Total		Product Yield %	Materials as % of Original CRD Fibre	
	Yield %	% of Preceding Cascaded Product		Material	Yield %
Glulam	68%	Glulam	68%	Cascade 1	100%
OSB	48%	OSB	70%	Cascade 2	100%
Particleboard	94%	Particleboard	88%	Cascade 3	94%

Figure 14. CRD Wood Fibre Cascading Product Fibre Yields Summary

In order to evaluate the direct cost impact of utilizing CRD wood fibre in industrial operations, we have estimated the representative furnish mix for each end-user. These estimates are presented in Figure 15.

	Round-wood	Lumber	Chips	Shavings	Sawdust	Bark	Fines	Non-wood	Internal	Total
Particle Board	-	-	5%	45%	50%	-	-	-	0%	100%
MDF	-	-	5%	25%	70%	-	-	-	0%	100%
Cogen	-	-	5%	-	15%	20%	-	60%	-	100%
OSB	100%	-	-	-	-	-	-	-	-	100%
Finger jointed lumber	-	100%	-	-	-	-	-	-	-	100%
Glulam/CLT	-	100%	-	-	-	-	-	-	-	100%

Figure 15. Non-CRD Furnish Mix (% total non-CRD fibre furnish)

We have also estimated the types and grades of CRD wood fibre that these same end-users might purchase if was available on the open market. The percentages represent the percent of CRD involved and not the percentage of overall fibre furnish.

	Solid wood		Chips			Total
	Lumber	Solid Wood	Grade 1	Grade 2	Grade 3	
Particle Board	-	-	20%	80%	-	100%
MDF	-	-	20%	80%	-	100%
Cogen	-	-	-	60%	40%	100%
OSB	0%	100%	-	-	-	100%
Finger jointed lumber	100%	-	-	-	-	100%
Glulam/CLT	100%	-	-	-	-	100%

Figure 16. CRD Purchase Mix (% total CRD Fibre)

The key factors driving the impact on cost are: 1) what level of substitution will occur between non-CRD furnish and CRD wood fibre; and 2) what are the unit pricing levels of the various inputs.

In order to simplify the analysis we have used a substitution rate of 20% CRD wood fibre for traditional furnish across the board for the analysis. In terms of unit pricing, we have used the following pricing assumptions for wood fibre and CRD wood fibre. (See Figure 17).

Recycled Wood Selling prices

Grade 1 chips	45 \$/tonne
Grade 2 chips	10 \$/tonne
Grade 3 or lower chips	0 \$/tonne
CRD Lumber	101 cost per tonne
Other Solid wood	76 cost per tonne

Virgin wood Prices

Hardwood logs (m3)	45 \$/m3
Lumber (US\$/Mfbm)	350 US\$/mfbm
Chip prices (\$/tonne or Mbfm)	80 \$/tonne
Cogen non-wood prices (\$/tonne)	45 \$/tonne
Shavings	45 \$/tonne
Sawdust	45 \$/tonne
Bark	36 \$/tonne
US\$/C\$	0.8

Figure 17. Commodity Unit Price Assumptions

Based on the preceding input, we have calculated that adding 20% CRD wood fibre to the furnish mix, generally results in low feedstock costs, however this conclusion is not equal across all commodities. The key outlier is OSB, which benefits from a small decrease in fibre costs. This is largely due to the fact that we are substituting recycled lumber/glulam for hardwood logs. The current pricing assumptions do not place a low enough value on recycled lumber to materially stimulate the substitution for hardwood logs.

		Virgin Fibre Only Cost per Unit	Fibre cost Mixed Virgin/CRD Fibre Cost per Unit	Variance	% Savings
Particle Board	tonnes/m3	32.26	28.15	4.11	-13%
MDF	tonnes/m3	32.26	28.15	4.11	-13%
Cogen	tonnes/Mwh	32.36	26.76	5.61	-17%
OSB	tonnes/msf	45.49	44.04	1.45	-3%
Finger jointed lumber	mfbm/Mfbm	450.63	381.28	69.34	-15%
Glulam/CLT	mfbm/m3	354.38	299.85	54.53	-15%

Figure 18. CRD Fibre Cost Impact

We have also attempted to qualify our results in terms of impact on total operating costs for each end-user. To accomplish this we used rough rules of thumb to qualify the proportion of operating costs that wood typically represents in these industries. These ratios appear in Figure 19.

Wood as a percentage of operating costs

Particle Board	26%
MDF	21%
Cogen	29%
OSB	35%
Finger jointed lumber	85%
Glulam/CLT	52%

Figure x. Wood As a Percentage of Operating Costs

Our calculation of the operating costs analysis indicates that the substitution of CRD wood fibre in the fibre furnish is greatest for finger-jointed lumber and mass timber producers. This is largely due to the importance of wood fibre to their overall operating cost structure.

Particleboard, MDF and cogen are moderately impacted given the ability of CRD wood fibre to successfully substitute for higher priced furnish alternatives.

OSB is least impacted given the minimum relative cost difference between virgin and recycled fibre.

	Non-wood Cost	Wood Cost	Operating cost	Mixed Virgin/CRD Fibre Cost	Adjusted operating cost	Change in Operating Costs
Particle Board	92	32	124	28	120	-3.3%
MDF	132	35	168	28	161	-4.2%
Cogen	79	32	112	27	106	-5.0%
OSB	84	45	130	44	129	-1.1%
Finger jointed lumber	80	451	530	381	461	-13.1%
Glulam/CLT	327	354	681	300	627	-8.0%

Figure 17. CRD Operating Cost Impact

Conclusions

Our analysis of recycled CRD wood fibre in Quebec indicates that there is enough supply to meet a level of demand compatible with industrial end-users, especially if recycling targets are met by the province of Quebec. The substitution of CRD wood fibre at these facilities could generate significant savings for these operations given the pricing we used in our analysis and assuming reasonable transportation distances.

However, CRD wood fibre is a low value, high volume commodity subject to many factors outside the control of the main market participants. In particular, the pricing of tipping fees and fuel, along with the availability of sawmill wood chips can rapidly eliminate the competitive advantage CRD material.

Greater certainty around the level, quality and pricing of recovered CRD material are needed to drive investment by both buyers and sellers. As uncertainties diminish, a critical install base of wood fibre processing should encourage new consumers to the market.

References

Profil de la gestion des débris de construction, rénovation et démolition (CRD) au Québec (Vachon, 2009)

Bilan 2015 de la gestion des matières résiduelles au Québec (RECYC-QUEBEC, 2017)

Résidus de construction, de rénovation et de démolition CRD (RECYC-QUEBEC, 2018)

CORRIM: Phase II Final Report: Particleboard: A Life-Cycle Inventory of Manufacturing Panels (Wilson 2008)

Statscan Quebec Housing

<https://www150.statcan.gc.ca/t1/tbl1/en/cv.action?pid=3410013501#timeframe>)

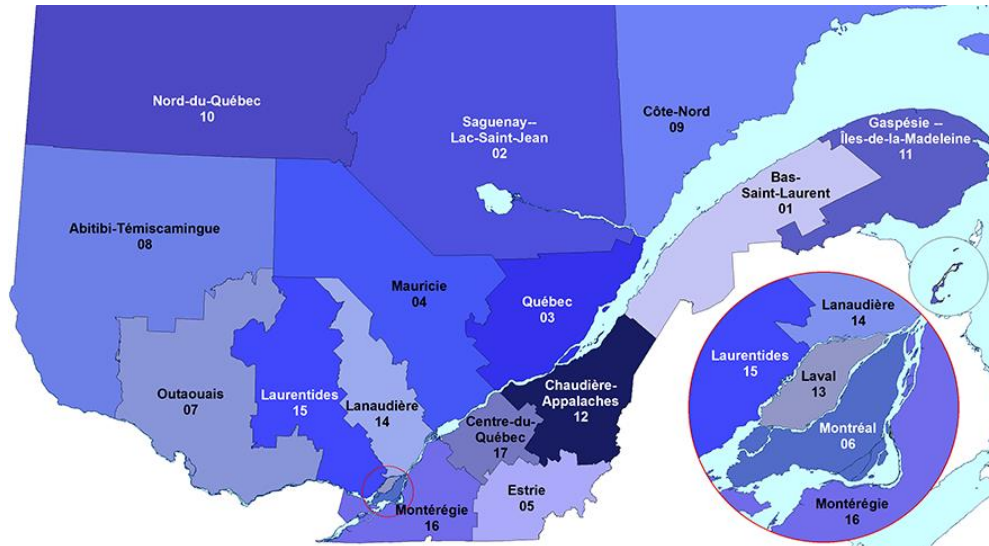
<https://www12.statcan.gc.ca/census-recensement/2016/dp-pd/dt-td/Rp->

Hydro Quebec (<http://www.hydroquebec.com/achats-electricite-quebec/contrats-electricite.html>)

<https://www.ecohabitation.com/guides/2780/faire-acheminer-les-dechets-de-renovation-vers-des-ecocentres-ou-des-centres-de-tri/>

STATUS OF ENERGY USE IN CANADIAN WOOD PRODUCTS SECTOR (NRCAN, 2010)

Appendix



Regional Map of Quebec

Sorting Centre	City	Region	Annual Tonnage
Véolia environnement	Sainte-Foy	Capitale-Nationale	100,000
Conteneurs Rock Forest	Sherbrooke	Estrie	60,000
Compo-Recyc	Chertsey	Lanaudière	20,000
Multi-Recyclage	Laval	Laval	100,000
Bellemare Recyclage	Trois-Rivières	Mauricie	160,000
Mélimax	La Prairie	Montérégie	250,000
Ecoservices TRIA (J.M. Langlois)	La Prairie	Montérégie	150,000
Le Centre de transformation des matières recyclables (TMR)	Châteauguay	Montérégie	30,000
Conteneurs Rouville	Chambly	Montérégie	25,000
Les entreprises environnementales de Pierrefonds (LEEP)	Montréal	Montréal	250,000
Multi-recyclage S.D.	Montréal	Montréal	75,000
MALEX (TRANSFORCE-MATREC)	Gatineau	Outaouais	50,000
RMSO – MYRAL	Aylmer	Outaouais	35,000

Select CRD Sorting Facilities, 2009



info@fpinnovations.ca
www.fpinnovations.ca

NOS BUREAUX

Pointe-Claire
570, boul. Saint-Jean
Pointe-Claire (Qc)
Canada H9R 3J9
(514) 630-4100

Vancouver
2665, East Mall
Vancouver (C.-B.)
Canada V6T 1Z4
(604) 224-3221

Québec
1055, rue du P.E.P.S.
Québec (Qc)
Canada G1V 4C7
(418) 659-2647