

Table des Matières

Résumé	iii
Abstract	v
Table des Matières.....	vii
Liste des Tableaux.....	x
Liste des Figures	xi
Remerciements.....	xv
Avant-propos	xvi
Introduction	1
Contexte et Problématique	3
Chapitre 1 Revue de Littérature	6
Les matériaux composites.....	6
1.1. Les matériaux composites à base de bois (composites à matrice organique).....	7
1.1.1. Classification des matériaux composites à base de bois	8
1.2. Les matériaux composites à structure sandwich.....	11
1.2.1. Caractéristiques d'un matériau composite à structure sandwich	11
1.2.2. Composant d'un matériau composite à structure sandwich	12
1.2.2.1. Les peaux	13
1.2.2.2. Le noyau ou âme.....	14
1.2.2.3. L'adhésif.....	15
1.2.3. Considérations mécaniques des matériaux composites à structure sandwich	16
1.2.3.1. Rigidité à la flexion d'un matériau composite à structure sandwich	16
1.2.4. Endommagement du matériau composite à structure sandwich	19
1.2.5. Fabrication des matériaux composites à structure sandwich	20
1.2.6. Application des matériaux composites à structure sandwich.....	21
1.3. Amélioration des propriétés physiques et mécaniques des matériaux composites	23
1.3.1. Amélioration des propriétés physiques et mécaniques des matériaux composites à base de bois	23
1.3.2. Amélioration des propriétés physiques et mécaniques des matériaux composites à base de bois à travers une structure sandwich	26
1.4. Performance environnementale des matériaux composites	27
1.4.1. L'analyse du cycle de vie	28
1.4.1.1. Phases de l'analyse du cycle de vie	29
1.4.2. Détermination des impacts environnementaux des matériaux composites à base de bois.....	34
1.4.3. Détermination des impacts environnementaux des matériaux composites à structure sandwich	37
1.4.4. Détermination des impacts environnementaux de l'aluminium.....	38
1.5. Les applications potentielles des matériaux composites à structure sandwich développés.....	41
1.5.1. La recherche qualitative.....	41
1.5.1.1. Caractéristiques de la recherche qualitative.....	42

1.5.2. La théorie ancrée (<i>Grounded theory</i>).....	43
Chapitre 2 Objectifs	46
Chapitre 3 Rétrospective méthodologique	47
3.1. Essais préliminaires	47
3.1.1. Discussion des résultats des essais préliminaires.....	54
3.2. Caractérisation des matériaux composites à structure sandwich.....	56
3.2.1. Matériaux pour la fabrication des matériaux composites à structure sandwich.....	57
3.2.2. Processus de fabrication des matériaux composites à structure sandwich.....	58
3.2.3. Essais physico-mécaniques des panneaux agglomérés à base de bois.....	59
3.2.4. Essais physico-mécaniques des matériaux composites à structure sandwich	60
3.2.5. Le dispositif expérimental	60
3.3. Détermination de la performance environnementale des matériaux composites à structure sandwich.....	61
3.4. Détermination des applications potentielles des matériaux composites à structure sandwich.....	62
3.4.1. Population à l'étude et échantillon.....	62
3.4.2. Échantillonnage théorique	63
3.4.3. Critères d'inclusion des participants	63
3.4.4. Recrutements des participants	63
3.4.5. Le mode de collecte des données.....	64
3.4.6. L'instrument de collecte des données	64
3.4.7. Analyse des données.....	65
Chapitre 4 Aluminum-laminated Panels: Physical and Mechanical Properties	67
4.1. Résumé	67
4.2. Abstract.....	68
4.3. Introduction.....	69
4.4. Objective	71
4.5. Experimental	71
4.5.1. Materials	71
4.5.2. Methods	73
4.6. Results and Discussion.....	77
4.6.1. Physical Properties	77
4.6.2. Mechanical Properties	80
4.6.3. Cost Assessment of Aluminum-laminated Panels	86
4.7. Conclusions.....	87
Chapitre 5 Life cycle assessment contribution in the product development process: Case study of wood aluminum-laminated panel.....	89
5.1. Résumé	89
5.2. Abstract.....	90
5.3. Introduction.....	91

5.4. Methodology: life cycle assessment (LCA)	95
5.5. Goal and scope of the study	95
5.5.1.1. Functional unit (FU)	95
5.5.1.2. Definition of system boundary from cradle-to-gate.....	95
5.5.1.3. Description of the studied panels.....	96
5.5.1.4. Description of manufacturing process of the wood aluminum-laminated panel.....	98
5.5.1.5. Description of manufacturing process of the Aluminum Honeycomb panel	99
5.5.1.6. Assumptions and limitation	100
5.6. Life cycle inventory	100
5.7. Life cycle impact assessment method (LCIA)	102
5.8. Results and discussion	104
5.8.1. Analysis of manufacturing processes of wood-based composite and of aluminum honeycomb panels without lamination.	104
5.8.2. Analysis of manufacturing process of WAL panels and AHP	110
5.8.3. Sensitivity analysis	114
5.9. Conclusion	115
Chapitre 6 Potential applications of wood aluminum-laminated panels: Using a grounded theory approach	118
6.1. Résumé	118
6.2. Abstract	119
6.3. Introduction	120
6.4. Background	121
6.5. Methodology	124
6.5.1. Interviewees.....	125
6.5.2. Conducting interviews	126
6.5.3. Data analysis.....	126
6.6. Results and discussion	127
6.7. Conclusions	134
Conclusion générale	136
Bibliographie	140
Annexes	151
Annexe A-1 : Contenu du courriel et/ou appel téléphonique	152
Annexe A-2 : Instrument de collecte des données	153
Annexe A-3 : Formulaire de consentement - entrevue	155
Annexe B-1 : Poster présente dans la conférence SWST 2014 (Chapitre 4)	157

Liste des Tableaux

Chapitre 1

Tableau 1.1: Exemples de matériaux composites (d'après Berthelot 2005).....	7
Tableau 1.2: Principales propriétés de fibres de renforcement communes (Bouffard et Amiotte 2011).....	23
Tableau 1.3: Propriétés mécaniques des panneaux renforcés d'HDF et de contreplaqué de peuplier faux-tremble (Bouffard et Amiotte 2011).....	26

Chapitre 3

Tableau 3.1: Résultats de la recherche sur les sites web des matériaux composites comme substrat pour les lames de plancher d'ingénierie.	48
Tableau 3.2: Paramètres de pressage du panneau contreplaqué de peuplier faux-tremble renforcé	50
Tableau 3.3: Paramètres de pressage des matériaux composites.....	59

Chapitre 4

Table 4.1: Physical properties of wood-based composites	72
Table 4.2: Physical property values of wood-based composites with and without the lamination of aluminum alloy sheets	79
Table 4.3: Mechanical property values of wood-based composites with and without lamination with aluminum alloy sheets	80
Table 4.4: Estimated manufacturing cost of aluminum-laminated panels.....	86

Chapitre 5

Table 5.1: Physical and mechanical properties of the WAL panels and AHP	97
Table 5.2: WAL panels and AHP manufacturing inventory data (1 m ² of laminated panel)	102
Table 5.3: Hotspots in wood-based composites and aluminum honeycomb manufacturing processes	108
Table 5.4: IMPACT 2002+ end-point results: Comparison of WAL panels and AHP. .	110
Table 5.5: Emission of CO ₂ in kg (WAL panels and AHP). IMPACT 2002+ method. .	112
Table 5.6: IMPACT 2002+ end-point results: Comparison of consumption of epoxy resin and polyurethane adhesive.....	113

Chapitre 6

Table 6.1: Comparison of environmental impacts for WAL panels and AHP. Using IMPACT2002+ method.	124
Table 6.2: Characteristics of interviewees	128
Table 6.3: Main considerations in the WAL panel development process according to interviewees	129
Table 6.4: Main potential applications of WAL panels from interviewees	133

Liste des Figures

Chapitre 1

Figure 1.1: Classification de matériaux composites à base de bois basée sur la taille des particules, la densité et les processus de fabrication (d'après Stack et al 2010).....	9
Figure 1.2: Structure d'un matériau composite à structure sandwich (d'après Gay 2005)11	
Figure 1.3: Les différents éléments constitutifs d'un matériau composite à structure sandwich	12
Figure 1.4: Module d'élasticité par rapport à la masse volumique de divers types de matériaux (d'après Ashby 1999).....	13
Figure 1.5: L'effet de l'épaisseur du noyau sur la rigidité en flexion d'un matériau composite à structure sandwich.....	14
Figure 1.6: Influence de l'épaisseur de l'adhésif sur la résistance de l'assemblage (Bathias et al. 2009)	15
Figure 1.7: Vue en coupe d'une poutre sandwich symétrique. "c" représente l'emplacement du centroïde pour chacune des peaux ou des revêtements, et "y" l'axe neutre de la poutre (d'après Carlsson et Kardomateas 2011).	17
Figure 1.8: Endommagement du matériau composite à structure sandwich (d'après Malavia 2012)	20
Figure 1.9: Méthode de fabrication du matériau composite à structure sandwich en utilisant une presse à chaud (d'après Gay 2005)	21
Figure 1.10: Cycle de vie d'un produit (CIRAIG 2005).....	29
Figure 1.11: Phases d'une Analyse du Cycle de Vie (ISO 2006a)	30
Figure 1.12: Contexte géographique des méthodes d'analyse d'impact (d'après Margni 2014)	33
Figure 1.13: Cycle de vie de produits d'aluminium (Association d'aluminium 2013)	39

Chapitre 3

Figure 3.1: Courbes de déformation au tuilage des matériaux composites	49
Figure 3.2: Configuration du panneau contreplaqué renforcé avec tissu de fibre naturel ou synthétique	50
Figure 3.3: Module d'élasticité des matériaux composites (trois plis) de peuplier faux-tremble renforcés avec fibres naturelles et fibres synthétiques.	51
Figure 3.4: Module d'élasticité des matériaux composites (cinq plis) de peuplier faux-tremble renforcés avec fibres naturelles et fibres synthétiques.	52
Figure 3.5: Résultats des essais en flexion à trois points : Module d'élasticité (MOE) des panneaux agglomérés à base du bois et matériaux composites à structure sandwich. PCC : Panneau contreplaqué commercial, PL : Panneau contreplaqué au laboratoire, PCHDF : Panneau commercial HDF, PCMDF : Panneau commercial MDF, PCOSB : Panneau commercial OSB, AL1 : Alliage d'aluminium de 0,6mm d'épaisseur, AL2 : Alliage d'aluminium de 0,3mm d'épaisseur.....	53
Figure 3.6: Résultats des essais en flexion à trois points : Module de rupture (MOR) des panneaux agglomérés à base du bois et matériaux composites à structure sandwich. PCC : Panneau contreplaqué commercial, PL : Panneau contreplaqué au laboratoire, PCHDF : Panneau commercial HDF, PCMDF : Panneau commercial MDF, PCOSB : Panneau	

commercial OSB, AL1 : Alliage d'aluminium de 0,6mm d'épaisseur, AL2 : Alliage d'aluminium de 0,3mm d'épaisseur.....	54
Figure 3.7: Configuration du panneau composite à fabriquer	57
Figure 3.8: Composant du matériau composite à structure sandwich	58

Chapitre 4

Figure 4.1: Schematic illustration of aluminum-laminated panel.....	73
Figure 4.2: Approach for estimation of manufacturing cost of aluminum-laminated panels	76
Figure 4.3: Manufacturing process of aluminum-laminated panels. *Quantity of material	76
Figure 4.4: Effects of aluminum alloy sheets on the E_{app} of wood-based composites. E_{app} values are the average of 12 replications for each laminated panel and of six replications for each non-laminated wood-based composite.....	81
Figure 4.5: Effects of aluminum alloy sheets on the MOR of wood-based composites. MOR values are an average of twelve replications for each aluminum-laminated panel and of six replications for each wood-based composite without lamination.....	82
Figure 4.6: IB strength values of laminated panels and wood-based composites without lamination. IB strength values are the average of twelve replications for each laminated panel and of nine replications for each wood-based composite without lamination.	84
Figure 4.7: Effect of aluminum alloy sheets on the edgewise shear strength of wood-based composites. Edgewise shear values are an average of eight replications for each laminated panel and wood-based composite without lamination.	85

Chapitre 5

Figure 5.1: Cradle-to-gate Life cycle boundaries of wood aluminum-laminated panels and aluminum honeycomb panel.*WAL panels manufacturing.	96
Figure 5.2: (a)Typical layout of wood aluminum-laminated panel and Aluminum honeycomb panel. (b): Aluminum honeycomb manufacturing process	97
Figure 5.3: Characterization of the midpoint impacts of wood-based composites and aluminum honeycomb manufacturing processes	105
Figure 5.4: Comparison of wood-based composites manufacturing and aluminum honeycomb manufacturing by damage category.	109
Figure 5.5: Relative contribution at endpoint categories (in %) of each manufacturing process of WAL panels and AHP. a: MDF aluminum-laminated panel; b: OSB aluminum-laminated panel; c: Plywood aluminum-laminated panel; d: Aluminum honeycomb panel.	111
Figure 5.6: Sensitivity analysis results: impact category according to IMPACT 2002+ method compared to TRACI method.....	115

Chapitre 6

Figure 6.1: Typical layout and physical and mechanical properties of wood aluminum-laminated panels.....	122
Figure 6.2: Cradle-to-gate life cycle boundaries of wood aluminum-laminated panels and aluminum honeycomb panel.*WAL panels manufacturing.	123

La tarea es organizarse y luchar. Realizar el trabajo con la idea de que este sea algo duradero. Trabajar para que cuando no estemos los demás continúen.

Fanny Abanto Calle

Rapport-Gratuit.com

À mes parents

Remerciements

C'est un plaisir de remercier tous ceux qui ont contribué à la réalisation de ce projet de recherche. En premier lieu, j'aimerais remercier mon directeur de recherche, Pierre Blanchet et mes co-directeurs, Robert Beauregard et Costel Barbuta, pour sa disponibilité et pour m'avoir donné la chance de travailler sur ce projet et de m'avoir soutenu durant toute la période de mon doctorat.

Mes remerciements vont également à monsieur Ben Amor pour m'avoir aidé et engagé son temps pour travailler avec moi sur l'analyse du cycle de vie.

Je remercie également le personnel technique et administratif du CRMR et de la Faculté de Foresterie, géographie et géomatique pour leur collaboration dans les différentes étapes de mon projet. Merci Guylaine Bélanger, Daniel Bourgault, Luc Germain, Yves Bédard, David Lagueur, Jean Ouellet.

J'aimerais également remercier le Conseil de recherche en sciences naturelles et génie (CRSNG) et FPInnovations pour son soutien financier et technique pour la réalisation du présent travail.

Un grand merci à mes collègues du Centre de recherche sur les matériaux renouvelables (CRMR) et amis pour leur soutien et amitié pendant le temps de mon doctorat. Merci Diane, Étienne, Claudia, Mariana, Aline, Miriam, Jedi, Bruna, Kim, Marc, Luis.

Je voudrais remercier à ma famille. À mes parents, mes frères et ma sœur pour son soutien dans toutes les étapes de cette thèse. Un dernier remerciement à ma femme Natalia et à mon bébé Alonso de m'avoir permis de partir pour finir mon doctorat.

Avant-propos

Ce projet de recherche a été réalisé en étroite collaboration entre FPInnovations, division des produits du bois et le CRMR de l'Université Laval. La recherche a été supervisée par M. Pierre Blanchet à titre de directeur de recherche et M. Robert Beauregard et M. Costel Barbuta à titre de co-directeurs. Les travaux ont été réalisés dans le cadre du programme de doctorat en sciences du bois et les résultats obtenus sont présentés sous la forme d'une thèse de publications. Les références des trois articles qui font parties intégrantes de cette thèse sont les suivantes :

Chapitre 4:

Franz Segovia, Pierre Blanchet, Costel Barbuta, and Robert Beauregard. 2015. *Aluminum-laminated Panels: Physical and Mechanical Properties*. Publié dans le Journal *BioResources*. 2015. Vol 10 (3): 4751 – 4767.

Chapitre 5:

Franz Segovia, Pierre Blanchet, Ben Amor, Costel Barbuta and Robert Beauregard. 2017. *Life cycle assessment contribution in the product development process: Case study of wood aluminum-laminated panel*. Article soumis dans l'*International journal of product development*.

Chapitre 6:

Franz Segovia, Pierre Blanchet, Costel Barbuta and Robert Beauregard. 2017. *Potential applications of wood aluminum-laminated panels: Using a grounded theory approach*.

Les résultats ont été partie d'un article intitulé: ***Aluminium laminated wood composites: Optimal manufactured parameters***, lequel a été soumis à la 57ème Convention internationale de la Société des sciences et technologies du bois réalisé à l'université technique de Zvolen, Slovaquie.

Les résultats de la recherche ont également été présentés sous forme de présentations orales aux évènements suivants :

- 82^e Congrès de l'Association Francophone pour le Savoir (ACFAS), le 13 Mai 2014, Université Concordia, Montréal, QC, Canada.
- 57^e Convention internationale SWST, 23-27 juin 2014. Université technique de Zvolen, Slovaquie.
- Cours SBO 8001, Séminaire II, à l'Hiver 2014, 18 Avril 2014, Québec, QC, Canada.

Introduction

L'importance des matériaux composites a été cruciale dans l'histoire. Un matériau composite est composé de deux éléments principaux : le renforcement et la matrice. La combinaison appropriée de ces composants crée des matériaux avec de meilleures propriétés que lorsqu'ils sont utilisés séparément. Les matériaux composites présentent plusieurs avantages par rapport aux produits traditionnels principalement pour leurs qualités fonctionnelles comme la légèreté, la résistance mécanique et chimique, la diminution des coûts d'entretien et la versatilité dans l'obtention de formes complexes. Ces matériaux peuvent se présenter sous diverses formes et compositions; ainsi, leurs applications couvrent de nombreux domaines : industrie aéronautique, aérospatiale, maritime, industrie automobile, secteur de la construction, etc.

Le développement d'un matériau composite à base de bois laminé avec alliage d'aluminium implique l'utilisation de composants largement produits au Québec comme l'aluminium et les panneaux agglomérés à base de bois. Ces types de composants donnent au matériau composite des avantages par rapport aux autres produits ou matériaux. La production d'aluminium primaire est une industrie majeure au Canada et tout particulièrement au Québec avec une capacité de production d'environ 3,2 millions de tonnes d'aluminium primaire en 2016 (Association de l'aluminium au Canada 2017). Cette production d'aluminium primaire s'explique principalement par la disponibilité d'une énergie électrique à faible coût. En plus, le Québec est l'un des principaux producteurs de panneaux agglomérés à base de bois, environ 2,6 millions de m³ de production annuelle de panneaux agglomérés à base de bois. Environ 39 usines de première et deuxième transformation sont réparties dans les diverses régions du Québec desquelles 16 usines sont spécialisées dans la production de panneaux agglomérés à base de bois (Yemele 2017).

En matière d'environnement, la production d'alliage d'aluminium au Québec présente des avantages par rapport à d'autres pays, principalement en raison de l'approvisionnement en électricité majoritairement issue des centrales hydroélectriques, lesquelles n'émettent que très peu de gaz à effet de serre. De la même manière, la production de matériaux

composites à base de bois implique certains avantages dus à l'utilisation de bois comme composant, mais aussi certains désavantages comme l'utilisation d'adhésif due aux émissions de formaldéhyde. L'utilisation d'un outil d'analyse environnementale comme l'analyse du cycle de vie pourrait confirmer ces avantages ou désavantages du matériau composite.

Pourtant, le développement d'un matériau composite bois/aluminium pourrait donner plusieurs avantages techniques, économiques et environnementaux, ainsi que conférer d'autres applications aux panneaux agglomérés à base de bois.

Le déroulement de ce travail de recherche se décompose en six parties principales. Après une brève introduction et mise en contexte, le premier chapitre présente une revue bibliographique concernant la performance technique et la performance environnementale des matériaux composites à base de bois, des matériaux composites à structure sandwich, ainsi que des alliages d'aluminium. Dans le second chapitre, nous présentons l'objectif général de la recherche, ainsi que les objectifs spécifiques. Dans le troisième chapitre, nous présentons une description des essais préalables, les matériaux de l'étude, ainsi que le dispositif expérimental utilisé. Le quatrième chapitre est consacré à l'étude des propriétés physiques et mécaniques des matériaux composites à structure sandwich développés, ainsi que leur performance économique. Le cinquième chapitre porte sur l'étude d'analyses de cycle de vie comparative des matériaux composites à structure sandwich développés. Le sixième chapitre confronte les résultats expérimentaux et l'analyse du cycle de vie afin de déterminer les applications potentielles des matériaux composites à structure sandwich à travers une méthodologie de recherche qualitative. Une conclusion finale permettra de proposer une synthèse des principaux résultats obtenus et d'envisager les perspectives découlant de cette étude.

Contexte et Problématique

Dans la recherche de matériaux de type panneau avec des propriétés mécaniques élevées, peu de panneaux à base de fibres de bois se positionnent favorablement. Les panneaux agglomérés (matériaux composites à base de bois) sont communément classifiés en panneaux structuraux qui offrent une importante résistance mécanique et en panneaux non structuraux qui ne fournissent pas une résistance mécanique importante. Les premiers sont utilisés en murs, toitures et planchers de maison à ossature en bois, tandis que les seconds sont utilisés dans la fabrication de cabinets de cuisine, de salle de bain, ainsi que dans des meubles et des revêtements de bâtiments. Ces matériaux (structuraux et non structuraux) offrent de bonnes propriétés physiques et mécaniques selon leur utilisation, mais aussi certaines faiblesses comme une faible résistance à l'adsorption d'eau, une faible stabilité dimensionnelle et une vie utile limitée lorsqu'ils sont exposés à des changements d'humidité relative. Ceux-ci ne présentent toutefois pas de propriétés mécaniques de l'ordre de celles observées dans des panneaux tels que les panneaux de fibres de verre à alvéoles ou les panneaux d'aluminium à alvéoles.

Pour améliorer les propriétés et éviter les faiblesses des panneaux agglomérés à base de bois, les matériaux composites laminés (structure sandwich) constituent une alternative intéressante. Ces matériaux, selon leur composition, offrent une grande possibilité de design afin d'obtenir une bonne résistance mécanique avec une faible masse. Le développement d'un matériau composite à structure sandwich exige de prendre en considération différents aspects. La performance technique est un de ces aspects. Les propriétés physiques et mécaniques sont fortement influencées par les matériaux utilisés comme composants de surface ou de revêtement et de noyau ou de cœur. Dans l'optique d'optimiser le rapport résistance mécanique versus masse du composite, le choix des matériaux de chaque composant est très important. Pour la sélection du matériau de surface ou de revêtement, il est important de considérer différentes propriétés mécaniques comme le module d'élasticité et le module de rupture, mais aussi d'autres caractéristiques comme son épaisseur ou sa résistance à la corrosion et à l'humidité. Par contre dans le choix d'un matériau de noyau ou de cœur, les caractéristiques les plus importantes sont la faible masse et l'épaisseur du panneau. Les matériaux utilisés communément comme

revêtement sont la fibre de verre, la fibre de carbone, les métaux, le plastique et les fibres naturelles. Tandis que, les matériaux utilisés comme noyau sont les panneaux alvéolaires, la mousse de polystyrène, la mousse de polyuréthane, la laine de roche, etc. Il existe sur le marché plusieurs types de matériaux composites à structure sandwich qui sont disponibles commercialement, pour des applications diverses allant du bâtiment à l'aéronautique.

Dans le cadre d'une revue des matériaux disponibles, force a été de constater que les propriétés des matériaux composites traditionnels à base de bois (panneau de fibres de densité moyenne, panneau de lamelles orientées, panneau de particules, contreplaqué) et des produits de types laminés à cœur alvéolé présentent un fossé important. Dans l'esprit de combler ce fossé, différentes approches ont été considérées dont l'utilisation de tissus techniques de renfort tels que le chanvre, la fibre de verre et le kevlar. Ces approches ne se sont pas révélées concluantes. En décomposant le matériau observé comme le plus performant, le laminé d'aluminium à cœur d'aluminium alvéolé, il nous est apparu que les matériaux composites à base de bois pourraient substituer le noyau d'aluminium dans un tel composite, les faces étant les principales responsables de la performance mécanique observée.

Les matériaux composites à structure sandwich avec une haute résistance mécanique sont généralement coûteux en raison des matériaux utilisés et de leurs procédés de fabrication. Ils sont utilisés avec succès dans l'industrie des transports (terrestre, nautique et aéronautique), même si le prix reste élevé. En conséquence, la performance économique est un autre aspect à prendre en considération dans le développement d'un matériau composite à structure sandwich. Cette performance est liée d'abord aux différents coûts de production et aussi à son utilisation. La détermination de son utilisation implique les avantages ainsi que les contraintes du matériau composite. Il existe différents types de méthodologies pour déterminer ou proposer l'utilisation d'un produit dont la recherche qualitative. L'implication des concepteurs et des utilisateurs est d'une importance capitale pour le développement du matériau composite. C'est à travers des entrevues semi-dirigées avec les concepteurs et avec les utilisateurs que peuvent être déterminées ou proposées des utilisations potentielles du matériau. Les études d'impacts environnementaux ont

déterminé que les produits à base de bois comme les panneaux agglomérés présentent des avantages environnementaux à travers son cycle de vie en comparaison à d'autres types de produits. Ces avantages sont attribués principalement à la présence du bois (biomasse) et à une plus faible consommation de combustible fossile dans leur fabrication. De plus, les spécificateurs (architectes, designers, ingénieurs en conception) sont de plus en plus conscients des impacts environnementaux d'un produit. L'évaluation de la performance environnementale d'un produit demande l'analyse de toutes les étapes de son cycle de vie et de chaque matériau et techniques utilisées dans celui-ci.

Des expériences préalables ont déterminé que des panneaux composites à base de fibres de bois avec un laminage d'alliage d'aluminium offrent une bonne performance technique au changement d'humidité relative et que la structure sandwich est la meilleure alternative pour améliorer les propriétés physiques et mécaniques des panneaux agglomérés. De plus, la province de Québec produit des volumes importants de panneaux agglomérés à base de bois et d'alliage d'aluminium. Ce projet de recherche vise à évaluer le potentiel du matériau composite à structure sandwich composé d'un matériau composite à base de bois comme noyau et d'une tôle d'alliage d'aluminium comme revêtement ou peau, en considérant les performances supérieures à celles des panneaux traditionnels.

Chapitre 1 Revue de Littérature

Les matériaux composites

Un matériau composite est constitué de l'assemblage de deux matériaux de nature différente, se complétant et permettant d'aboutir à un matériau dont l'ensemble des performances est supérieur à celui des composants pris séparément (Berthelot 2005). Comme l'indique ce terme, « matériau composite » évoque un matériau différent des matériaux macroscopiquement homogènes habituels. On appelle maintenant de façon courante « matériaux composites » des arrangements de fibres continues ou non d'un matériau résistant (le renfort) qui sont noyées dans une matrice dont la résistance mécanique est beaucoup plus faible (Gay 2005). Le renfort est généralement constitué de fibres de petit diamètre à très hautes performances mécaniques et faible densité comme fibres d'origine naturelle ou synthétique, fibres minérales ou organiques. Les renforts les plus utilisés sont les fibres de verre et de carbone, bien que les fibres naturelles gagnent en popularité. Les renforcements peuvent être incorporés dans différentes matrices. Les matrices les plus communes sont les polymères thermoplastiques, thermodurcissables ou élastomères. Les matériaux composites sont définis par la nature de la matrice : les matériaux composites à matrice organique, à matrice minérale et à matrice métallique et sandwich (Martineau 1987; Berthelot 2005).

Les propriétés des matériaux composites résultent des propriétés des matériaux constituants, de leur distribution géométrique, de leurs interactions, etc. De la même façon, pour décrire un matériau composite, il est nécessaire de spécifier la nature des constituants et leurs propriétés, la géométrie du renfort et sa distribution, la nature de l'interface matrice-renfort (Berthelot 2005). La géométrie du renfort sera caractérisée par : sa forme, sa taille, la concentration du renfort, sa disposition (son orientation), etc. Le tableau 1.1 présente des exemples de matériaux composites selon le type de matrice.

Tableau 1.1: Exemples de matériaux composites (d'après Berthelot 2005)

Type de composite	Constituant
1. Composites à matrice organique	
Papier, carton	Résine/charges/fibres cellulosiques
Panneaux de particules	Résine/copeaux de bois
Panneaux de fibres	Résine/fibres de bois
Toiles enduites	Résines souples/tissus
Matériaux d'étanchéité	Élastomères/bitume/textiles
Pneumatiques	Caoutchouc/toile/acier
Stratifiés	Résine/charges/fibres de verre, de carbone, etc.
Plastiques renforcés	Résines/microsphères
2. Composites à matrice minérale	
Béton	Ciment/sable/granulats
Composite carbone-carbone	Carbone/fibres de carbone
Composite céramique	Céramique/fibres céramiques
3. Composites à matrice métallique	
	Aluminium/fibres de bore
	Aluminium/fibres de carbone
4. Composites à structure sandwich	
Peaux	Métaux, stratifiés, etc.
Âmes	Mousses, nids d'abeille, balsa, plastiques renforcés, etc.

1.1. Les matériaux composites à base de bois (composites à matrice organique)

Les matériaux composites à base de bois sont définis comme une famille de matériaux constitués de plus petites composantes de bois de formes différentes généralement agglomérées à l'aide d'un liant. Les matériaux composites à base de bois ont été développés durant la seconde moitié du 20^e siècle, à partir de technologies appliquées à la fabrication de contreplaqués, pour valoriser les déchets issus de la première et de la deuxième transformation du bois (Chapman 2006). Les principaux matériaux composites à base de bois sont les panneaux de fibre (faible densité, densité moyenne et haute densité), les panneaux de particules, les panneaux de lamelles (orientées ou non) et les panneaux contreplaqués (Lépine 2013). Le bois est un matériau naturel composite formé de cellulose, de lignine et d'hémicellulose. Afin de surmonter les inconvénients liés à la nature du bois (dimensions naturelles et orthotropie) plusieurs matériaux sont apparus sur le marché. L'encollage de plus petites composantes de bois à l'aide d'un adhésif permet

de mieux contrôler les propriétés du matériau résultant. Cela permet entre autres d'utiliser des arbres plus petit diamètre, d'utiliser les déchets de bois d'autres procédés comme le sciage, d'enlever les défauts présents dans le bois, comme les nœuds, pouvant affaiblir sa structure finale, de créer des composantes plus uniformes, de développer des composites plus résistants que le bois solide original et de décider de la forme finale du matériau produit (Berglund et Rowell 2005). Les critères de performance pour les composites à base de bois sont directement liés à l'utilisation finale du produit. Les produits laminés sont souvent utilisés à des fins structurelles. Pourtant il est nécessaire de prendre en compte les besoins au niveau de la résistance, de la sécurité et de la réponse à court et à long terme du matériel à l'environnement de service (Bucur 2011).

1.1.1. Classification des matériaux composites à base de bois

Les matériaux composites (panneaux agglomérés) à base de bois sont utilisés pour différentes applications structurales et non structurales. Par exemple, les panneaux de fibres de densité moyenne (MDF) sont couramment utilisés pour les meubles de cuisine et les moulures, tandis que les panneaux de lamelles orientées (PLO) et les panneaux contreplaqués sont principalement utilisés en construction (Maloney 1993). Les panneaux agglomérés peuvent être considérés comme un mélange de plusieurs composantes comme les particules de bois, le liant, la cire et l'eau. Les matériaux composites à base de bois sont classés en quatre groupes : panneaux de fibres feutrés, panneaux de particules comme les PLO et les MDF, panneaux bois-ciment et enfin, d'autres types de panneaux comme les contreplaqués de bois feuillus (Cloutier 2006). La classification des matériaux composites à base de bois se fait au moyen du poids spécifique, de la densité, de la matière première et des méthodes de fabrication (Figure 1.1).

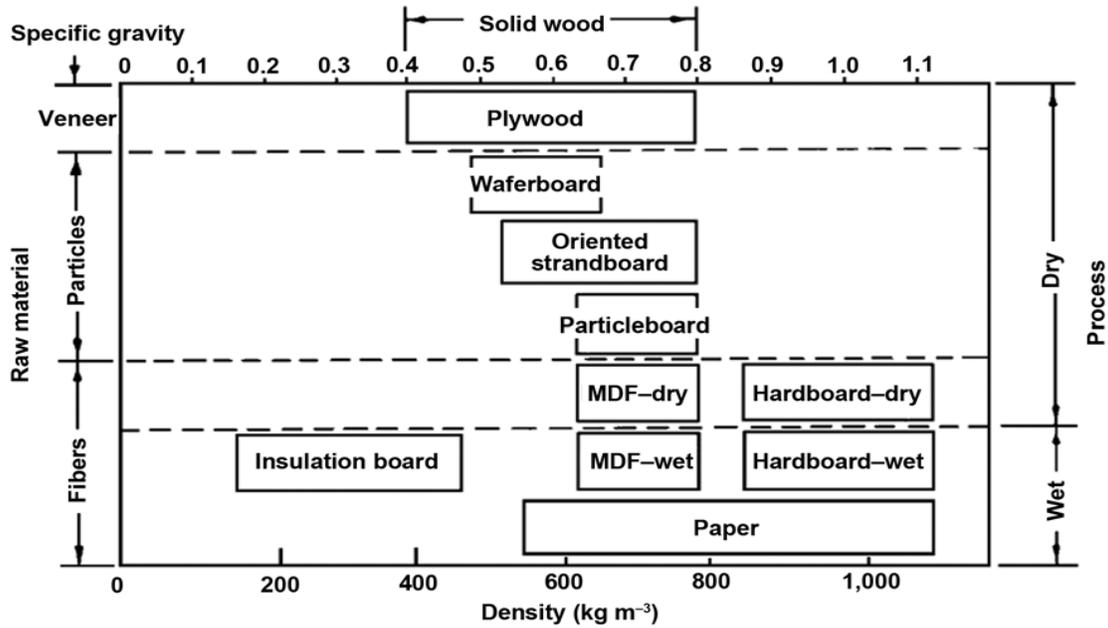


Figure 1.1: Classification de matériaux composites à base de bois basée sur la taille des particules, la densité et les processus de fabrication (d’après Stack et al. 2010).

Le MDF est un panneau fabriqué à l’aide de fibres de bois liées entre elles par un adhésif synthétique. Ces panneaux ont été développés depuis la fin des années 1960. Ils sont caractérisés par l’utilisation de fibres de bois dans un procédé à sec. Les panneaux sont comprimés jusqu’à une masse volumique moyenne de 500 à 800 kg/m³ sous l’effet de la chaleur et de la pression (Cloutier 2006). La matière première utilisée inclut les copeaux, les planures, les délignures, la sciure et la bagasse. Pour la fabrication des fibres, le processus de raffinage est utilisé. Le bois passe par un défibreur qui brise les liens entre le bois. La colle urée-formaldéhyde est largement utilisée pour le MDF à cause de son faible coût, mais elle s’utilise de moins en moins à cause des émissions de formaldéhyde. Les panneaux de fibres de densité moyenne sont classifiés selon leur masse volumique en : MDF (HD) avec une masse volumique supérieure à 800 kg/m³, MDF (MD) avec une masse volumique entre 640 et 800 kg/m³ et MDF (LD) avec une masse volumique inférieure à 640 kg/m³ (ANSI A208.2-2009 *American National Standard. Medium density fiberboard (MDF) for interior application*).

Les PLO sont fabriqués à partir de particules grossières appelées « lamelles », combinées à un liant résistant à l'eau comme le phénol formaldéhyde ou la mélamine phénol formaldéhyde et une cire. Les panneaux sont formés sous l'effet de la chaleur et de la pression. La matière première pour ce type de panneau est constituée principalement de petites billes de basse qualité de peuplier faux-tremble (Cloutier 2006). Les lamelles peuvent avoir des dimensions variables, le ratio (longueur/largeur) des lamelles doit être inférieur à trois. Les dimensions des lamelles et leurs formes influencent les propriétés en flexion des panneaux. Par exemple, des lamelles plus longues donnent un meilleur module d'élasticité en flexion. Ce type de panneau est largement utilisé pour les toits, les murs et le revêtement de sol. Les PLO sont généralement composés de trois couches de lamelles, les deux couches extérieures (surfaces) ayant des lamelles plus longues alignées selon la longueur du panneau et les lamelles de la couche centrale qui sont généralement orientées perpendiculairement aux couches de surface. Les panneaux agglomérés comme le PLO pour l'industrie canadienne sont normés selon les normes de la Canadian Standards Association (CSA), tandis que les MDF sont normés selon les normes de l'American National Standards Institute (ANSI).

Les contreplaqués sont en usage depuis 1920. Ils sont constitués de placages collés dont le fil de chaque placage est orienté perpendiculairement au fil de l'autre placage. Les panneaux contreplaqués sont formés à partir de déroulages de billes de bois. La longueur des contreplaqués est limitée par la taille des billes. Les billes sont d'abord immergées dans l'eau afin de réduire les propriétés mécaniques du bois ; elles sont ensuite installées sur des supports de chaque côté dans le sens de la longueur. Un couteau est ensuite approché de la bille en rotation afin de produire une entaille horizontale tout le long de la bille. En tournant, cette entaille crée une feuille de placage de bois. Les billes sont déroulées pour former des feuilles de bois. Les feuilles sont découpées en placages qui seront collés ensemble et pressés à 200°C en alternant le sens de la fibre du bois pour chaque couche de placage (Lépine 2013). Les contreplaqués dépendent de la qualité des placages, du nombre de placage, de l'adhésif utilisé et des paramètres dans la fabrication. Les panneaux contreplaqués ont une haute résistance à la flexion et une excellente stabilité dimensionnelle (Stack et al. 2010).

1.2. Les matériaux composites à structure sandwich

Les composites à structure sandwich consistent en l'assemblage par collage ou soudure de deux revêtements ou peaux minces, faits d'un matériau rigide et lourd, sur un noyau (cœur) épais et léger qui maintient leur écartement (figure 1.2). Le principal bénéfice que présente ce type de structure est leur propriété élevée en flexion en relation à leur faible poids. En plus, ces matériaux sont préférés à ceux conventionnels car ils présentent une résistance élevée à la corrosion. C'est pour cela que les matériaux composites à structure sandwich sont communément utilisés dans l'industrie aéronautique, automobile, marine et pour d'autres applications (Manolo et al. 2010). Les matériaux composites à structures sandwich peuvent être classifiés en quatre types : mousse cellulaire, nid d'abeille, carton ondulé et bois balsa.

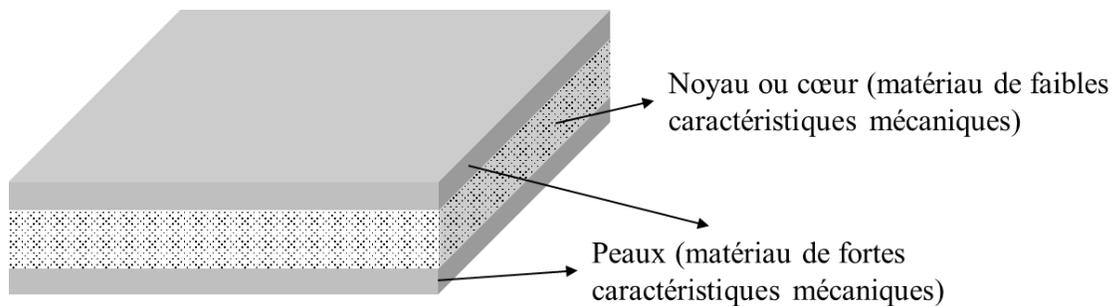


Figure 1.2: Structure d'un matériau composite à structure sandwich (d'après Gay 2005)

1.2.1. Caractéristiques d'un matériau composite à structure sandwich

Les matériaux composites à structure sandwich sont formés d'une grande variété de matériaux. Ces matériaux se caractérisent par une grande légèreté, une bonne rigidité à la flexion et une isolation thermique élevée (Gay 2005). Un matériau composite à structure sandwich est constitué généralement de trois composants possédant des propriétés différentes, mais complémentaires : les peaux, le noyau et l'adhésif. La figure 1.3 présente les différents éléments constitutifs d'un matériau composite à structure sandwich (Marouene 2010).

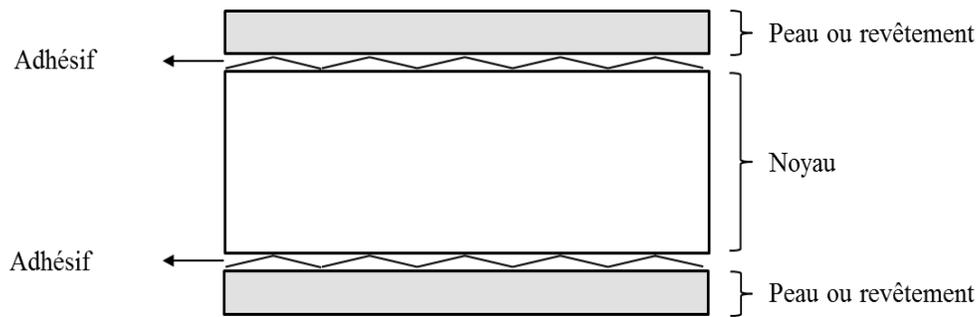


Figure 1.3: Les différents éléments constitutifs d'un matériau composite à structure sandwich

1.2.2. Composant d'un matériau composite à structure sandwich

Pour réussir une bonne sélection des matériaux d'un composite à structure sandwich, il est important de comprendre le fonctionnement de la structure dans l'ensemble. Par conséquent, il est aussi important de connaître les propriétés physiques et mécaniques de chacun des matériaux utilisés et la manière dont ils contribuent au fonctionnement du matériau composite (Figure 1.4). Comme il a été indiqué auparavant, les matériaux composites à structure sandwich sont composés de trois composants : deux feuilles ou peaux minces, un noyau (âme) et un adhésif. Les peaux ou revêtement doivent être fabriqués de matériaux avec un haut module d'élasticité (MOE), alors que le noyau doit être fabriqué de matériaux avec une faible masse volumique (Carlsson et Kardomateas 2011)

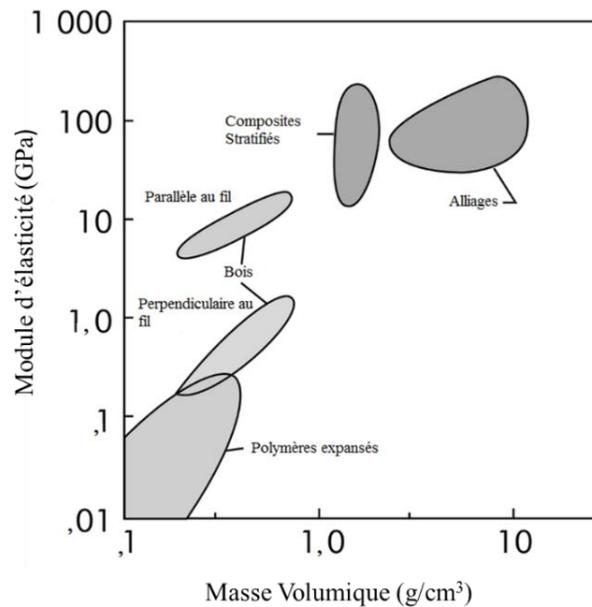


Figure 1.4: Module d'élasticité par rapport à la masse volumique de divers types de matériaux (d'après Ashby 1999)

1.2.2.1. Les peaux

Les peaux (revêtements) sont définies comme les laminés du matériau composite collés au noyau en un sandwich. Les matériaux utilisés comme peaux ont besoin d'avoir une rigidité élevée et une excellente résistance en tension et en compression pour résister aux charges en flexion. Les matériaux largement utilisés comme peaux sont entre autres les laminés de fibre de verre, de fibre de carbone, de fibres naturelles, les tôles ou feuilles de métaux, le bois (placages) et les plaques thermoplastiques.

Les paramètres propres à la peau, qui ont une influence déterminante sur le comportement mécanique des matériaux composites à structure sandwich sont généralement : la nature du matériau utilisé et l'épaisseur, et dans le cas des peaux composites stratifiées, la séquence d'empilement (Marouene 2010). Différentes études ont été réalisées pour déterminer l'influence des différents paramètres sur les propriétés physiques et mécaniques du matériau composite à structure sandwich comme l'épaisseur des peaux (Jen et Chang 2008).

1.2.2.2. Le noyau ou âme

Le noyau est normalement un matériau de faible résistance et caractéristique mécanique, mais d'une grande épaisseur. Cela donne à la structure sandwich une grande résistance à la flexion avec une faible masse volumique (Umair 2006). Le noyau a besoin d'être rigide et fort en cisaillement et aussi avoir une masse volumique faible pour minimiser le poids structurel (Carlsson et Kardomateas 2011). Il a pour rôle de résister aux contraintes de cisaillements engendrés suite aux mouvements de glissement des peaux sous charge et de maintenir leur écartement. Le noyau est souvent épais et de faible masse volumique. L'épaisseur élevée du noyau a pour but d'accroître le moment d'inertie du matériau composite sans augmenter la masse volumique. Comme le montre la figure 1.5, un matériau composite à structure sandwich d'épaisseur « $4.t$ » est 37 fois plus rigide que celui d'épaisseur « t », pour seulement une augmentation de 6% de son poids (Marouene 2010). Les matériaux les plus utilisés comme noyau dans les composites à structure sandwich sont les panneaux nid d'abeille métallique (aluminium, acier inoxydable, titane) et non métallique (*Nomex*, fibre de verre, papier *Kraft*). Les alliages d'aluminium communément utilisés sont le 3003 pour nid d'abeille de qualité commerciale et le 5052, le 5056 et le 2024 pour une utilisation spécifique (Bitzer 1997). D'autres matériaux sont utilisés comme noyau : la mousse de polyuréthane, le polystyrène expansé (EPS) et le bois de balsa.

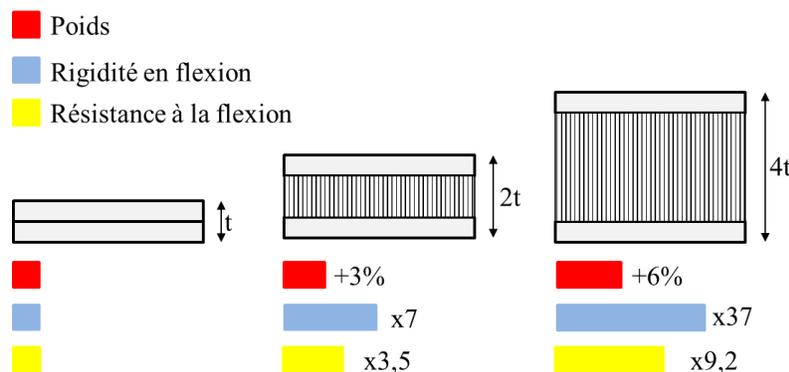


Figure 1.5: L'effet de l'épaisseur du noyau sur la rigidité en flexion d'un matériau composite à structure sandwich

1.2.2.3. L'adhésif

Dans le but d'unir les peaux (surface) au noyau (cœur), un adhésif est couramment utilisé. Dans plusieurs cas, l'assemblage par collage entre la peau et le noyau est un facteur critique pour le fonctionnement d'un matériau composite à structure sandwich. L'assemblage par collage des composites comprend l'insertion d'une couche mince de polymère, normalement une résine thermodurcissable de type époxyde, entre les deux pièces à coller. La réticulation de la résine, en général par la chaleur, crée un réseau qui lie les deux pièces à condition de bien maîtriser l'état des interfaces (Bathias 2009).

Pour obtenir un bon assemblage, différents aspects doivent être pris en compte comme la conception et le dimensionnement des assemblages collés, la préparation des surfaces à coller, l'influence de l'épaisseur de la colle et le choix de l'adhésif. D'un point de vue pratique, le traitement des surfaces à coller est une étape critique de l'assemblage, et un mauvais traitement peut entraîner une rupture inattendue à un niveau de charge très faible. Selon l'application, cette préparation peut être simple (un sablage et un dégraissage) ou beaucoup plus complexe (une série d'attaques chimiques ou des traitements au plasma et l'application et la cuisson de couches d'époxyde par exemple). L'influence de l'épaisseur de l'adhésif influe sur la résistance de l'assemblage. Il faut ainsi tenir compte de l'influence de ce paramètre afin d'optimiser la résistance de l'assemblage (figure 1.6).

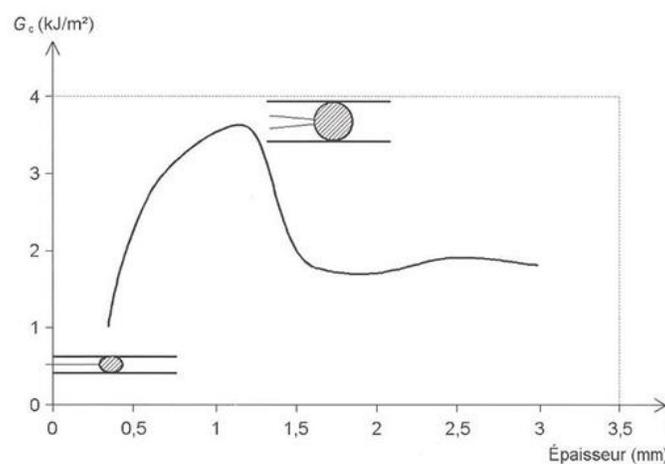


Figure 1.6: Influence de l'épaisseur de l'adhésif sur la résistance de l'assemblage (Bathias 2009)

La sélection de l'adhésif est un autre point critique pour l'assemblage. Les plus courants sont basés sur des résines époxydes, mais il existe une gamme très étendue d'autres polymères comme les polyuréthanes, les acryliques ou les phénoliques. Le choix de l'adhésif dépend de plusieurs facteurs : des conditions d'utilisation (température, environnement), des moyens de mise en œuvre (polymérisation à température ambiante ou à chaud), du temps d'utilisation, de la viscosité, des matériaux de substrat et de leur état de surface et des sollicitations mécaniques en service (Bathias et al. 2009).

Plusieurs expériences ont été réalisées pour étudier et améliorer l'interface entre les revêtements et le noyau des matériaux composites à structure sandwich (Cantwell et Davies 1996; Kawasaki et al. 1999; Kilic et al. 2009; Li et Weitsman 2004; Siriruk et al. 2008). Kilic et al (2009) ont démontré que le processus de ponçage a comme résultat une diminution de la rugosité superficielle, mais aussi une augmentation de la résistance à la traction.

1.2.3. Considérations mécaniques des matériaux composites à structure sandwich

Une structure sandwich se caractérise par une excellente efficacité structurelle et par d'autres avantages comme l'élimination de soudage, une qualité d'isolant supérieure et une versatilité en design (Paik et al. 1999). La résistance et la rigidité d'un matériau composite à structure sandwich est le résultat de la combinaison des propriétés de la peau, du noyau et de l'interface (adhésif). Un dommage dans un ou plusieurs des matériaux va occasionner un effet global dans les propriétés d'une structure sandwich. Pourtant, comprendre la contribution de la peau et du noyau au niveau de la résistance et de la rigidité des matériaux composites à structure sandwich est importante pour éviter les dommages qui peuvent affecter la performance des matériaux composites en service. Par la suite, se présente une analyse des matériaux composites à structure sandwich en flexion.

1.2.3.1. Rigidité à la flexion d'un matériau composite à structure sandwich

L'idée de base pour ce type de structure sandwich est que la séparation des revêtements permet d'augmenter la rigidité et la résistance à la flexion. Les peaux ont la même fonction que les ailes d'une poutre en I, supportant les charges de flexion au niveau de la traction

de la peau inférieure et la compression de la peau supérieure. Le noyau réalise une fonction similaire à l'âme de la poutre, en résistant aux charges en cisaillement.

En général, la rigidité à la flexion d'une poutre à structure sandwich est exprimée comme $E_x I$, selon le théorème d'axes parallèles, ce théorème fournit $E_x I$ en termes de module d'élasticité et de l'épaisseur des constituants de la poutre à structure sandwich. La figure 1.7 montre une vue en coupe d'une poutre sandwich symétrique. Les équations sont basées sur les hypothèses suivantes à savoir que l'épaisseur des peaux est plus mince que l'épaisseur de noyau, que le module d'élasticité des peaux est plus grand que le module d'élasticité du noyau et enfin, qu'il existe une liaison parfaite.

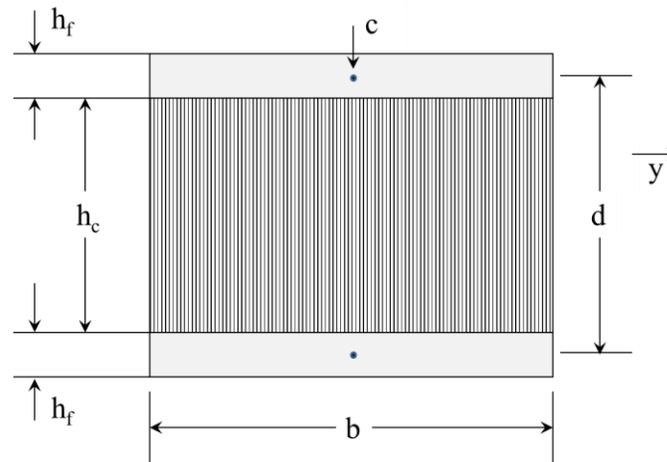


Figure 1.7: Vue en coupe d'une poutre sandwich symétrique. "c" représente l'emplacement du centroïde pour chacune des peaux ou des revêtements, et "y" l'axe neutre de la poutre (d'après Carlsson et Kardomateas 2011).

Où, selon le théorème d'axes parallèles.

$$E_x I = E_x^c I_c + 2E_x^f I_f \quad (1)$$

Où I_c et I_f sont les moments d'inertie du noyau et de chacune des peaux par rapport à l'axe neutre de la poutre (y)

$$I_c = \frac{bh_c^3}{12} \quad (2)$$

$$I_f = \frac{bh_f^3}{12} + \frac{bh_f d^2}{4} \quad (3)$$

Par conséquent, la rigidité à la flexion par unité de largeur de la poutre en sandwich devient

$$\frac{E_x I}{b} = \frac{E_x^c h_c^3}{12} + E_x^f \left(\frac{h_f^3}{6} + \frac{h_f d^2}{2} \right) \quad (4)$$

La quantité $E_x I/b$ est communément appelée "rigidité à la flexion", D_x est une simplification de l'équation antérieure.

$$D_x = E_x^f h_f d^2 \left[\frac{h_c^3}{12 h_f d^2} \left(\frac{E_x^c}{E_x^f} \right) + \frac{1}{6} \left(\frac{h_f}{d} \right)^2 + \frac{1}{2} \right] \quad (5)$$

Les structures sandwich sont sollicitées pour être légères. Pourtant, pour déterminer la rigidité à la flexion optimale, il faut tenir compte de la masse volumique des matériaux. Le poids W de la poutre type sandwich, normalisé par la largeur et la longueur de la poutre est donnée par :

$$\frac{W}{bl} = 2h_f \rho_f + h_c \rho_c \quad (6)$$

Où, ρ_f et ρ_c sont les masses volumiques des peaux et du noyau. La masse volumique moyenne (effective) des matériaux sandwich ρ^* est :

$$\rho^* = 2 \frac{h_f}{h} \rho_f + \frac{h_c}{h} \rho_c \quad (7)$$

Où, h est l'épaisseur total du matériau sandwich ($h = 2h_f + h_c$).

Si, le taux noyau/peaux par rapport à l'épaisseur est supérieur ou égal à 5,35 ($h_c/h_f > 5,35$), les peaux peuvent être considérées comme minces et la rigidité à la flexion devient :

$$D_x = \frac{E_x^f h_f d^2}{2} \quad (8)$$

Cette équation identifie les deux facteurs les plus importants pour réussir à avoir une haute rigidité à la flexion : un module d'élasticité des peaux élevé (E_x^f), et une longue distance entre les deux centroïdes des peaux (d). Une grande valeur de l'épaisseur des peaux (h_f) peut être bénéfique au niveau des propriétés, mais d'un point de vue du poids, cela ne serait pas du tout bénéfique pour le matériau sandwich. En conclusion, en considérant la rigidité à la flexion et le poids du matériau sandwich, le plus favorable dans le design d'un matériau sandwich est d'utiliser des peaux minces avec un module d'élasticité élevé et un noyau de faible masse volumique.

1.2.4. Endommagement du matériau composite à structure sandwich

Le dommage d'un matériau composite à structure sandwich soumis à une sollicitation est de plus haute importance pour la conception d'un matériau composite. Les dommages aux matériaux composites à structure sandwich peuvent apparaître au niveau de la peau, au niveau de l'âme et au niveau de l'interface (Figure 1.8). Les matériaux de la peau et du noyau doivent être capables de résister aux tensions de traction, compression et cisaillement induites par la charge de la conception. Ainsi, l'adhésif doit être en mesure de transférer les tensions de cisaillement entre la peau et le noyau.

Le matériau composite à structure sandwich doit avoir une rigidité à la flexion et au cisaillement suffisante pour éviter une déflexion excessive. L'épaisseur de l'âme et le module de cisaillement devraient également être suffisants pour éviter le flambage du matériau et éviter la rupture du noyau due aux charges de compression au niveau des extrémités. Par ailleurs, le module de compression de la peau et la résistance du noyau à la compression doivent être élevés pour éviter la défaillance de la peau. La résistance

locale du noyau doit être suffisante pour supporter les charges locales sous la surface du matériau composite à structure sandwich. La rupture des peaux peut arriver dans la surface en compression ou dans la surface en traction en raison de l'épaisseur insuffisante du matériau composite, ou de l'épaisseur insuffisante des peaux (Malavia 2012).

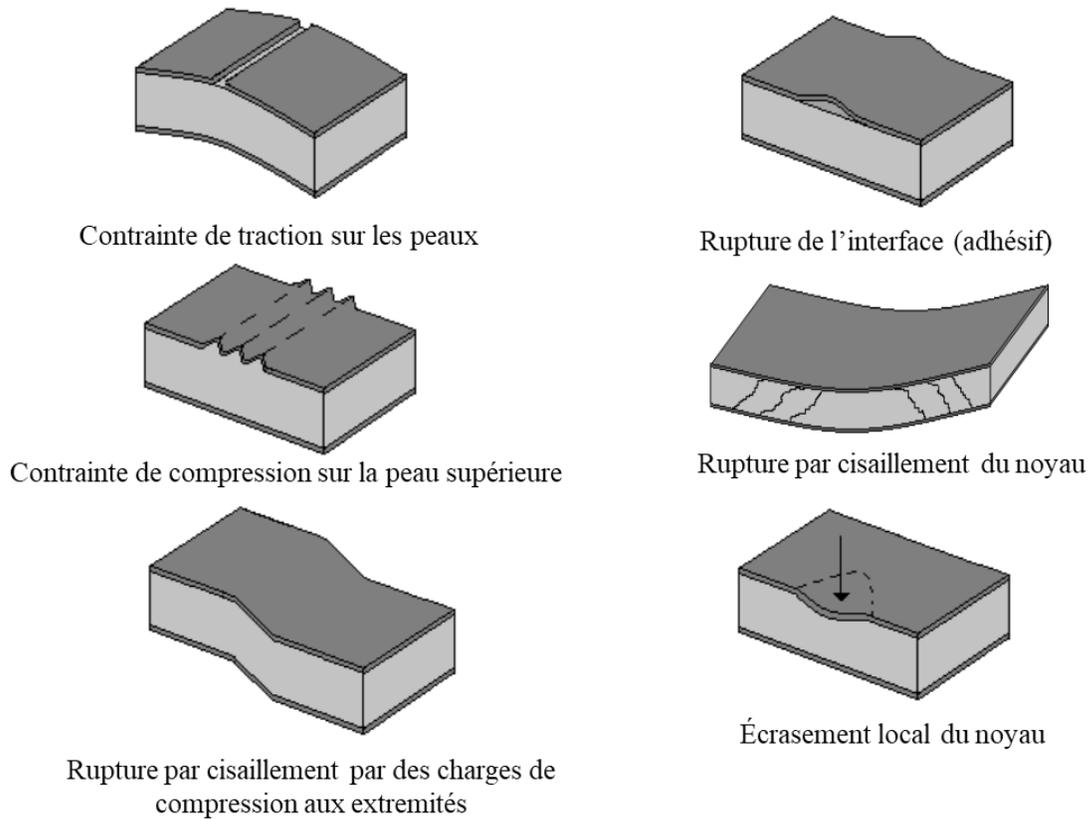


Figure 1.8: Endommagement d'un matériau composite à structure sandwich (d'après Malavia 2012)

1.2.5. Fabrication des matériaux composites à structure sandwich

Il existe différentes méthodes pour la fabrication des matériaux composites à structure sandwich, lesquels utilisent des sacs à vide, des autoclaves ou des presses chauffantes. Les autoclaves sont utilisés principalement pour les matériaux composites à structure sandwich de forme courbée tandis que les presses chauffantes sont utilisées pour les

matériaux plats (Figure 1.9). Les matériaux fabriqués en autoclave sont destinés principalement à l'industrie aéronautique.

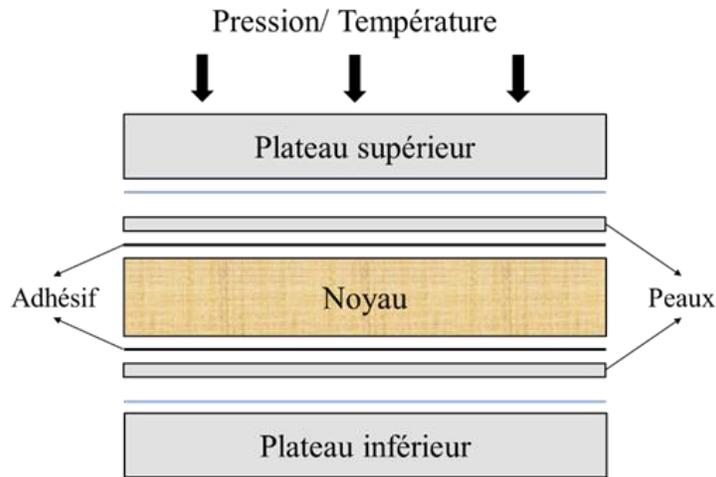


Figure 1.9: Méthode de fabrication d'un matériau composite à structure sandwich en utilisant une presse à chaud (d'après Gay 2005)

Les matériaux composites à structure sandwich peuvent présenter divers défauts induits lors du processus de fabrication ou des imperfections inhérentes au matériel utilisé comme noyau (défauts et vides). La cause la plus fréquente de ces défauts est le faible nombre de liaison ou la liaison manquante en raison de la négligence de fabrication ou d'un décalage dans la géométrie des composants sandwich (Shipsha 2001).

1.2.6. Application des matériaux composites à structure sandwich

Les matériaux composites à structure sandwich supposent une grande avance dans la conception de structures car ils permettent de concevoir des structures de rigidité et de résistance élevée avec un faible poids. Le développement des matériaux composites à structure sandwich est un concept qui a été inventé dans les années 1820, mais ce fut dans les années 1940 que sont apparues les premières applications dans la fabrication des avions militaires pour la seconde guerre mondiale (Marouene 2010). L'arrivée des fibres de verre tissées et de résines plus performantes au début des années 50, a permis la fabrication des premiers sandwichs à peaux composites et à cœur nid d'abeille (Castanié

2000). Ces dernières années, la plupart des avions civils ont des matériaux composites à structure sandwich comme composants de leur structure. Par exemple, les planchers de l'avion Boeing 747 sont fabriqués à partir d'un matériau composite à structure sandwich de bois de balsa et de feuilles d'aluminium.

Tout comme dans l'aviation, le fait d'avoir des matériaux de rigidité élevée et de faible poids a commencé à intéresser d'autres domaines. Les premières utilisations de matériaux composites à structure sandwich dans la structure des bateaux datent du début des années 60 avec l'utilisation de matériau fibre de verre/balsa. Ce type de construction a été rapidement développé pour les structures marines avec l'arrivée des frégates militaires furtives et des bateaux à grande vitesse (Castanié 2000). Par ailleurs, afin de réduire l'impact environnemental de la circulation automobile, les constructeurs automobiles ont commencé à utiliser des matériaux composites à structure sandwich pour réduire le poids des véhicules afin de réduire les émissions de CO₂. De la même façon et en considérant la même situation, l'utilisation des matériaux composites à structure sandwich a été développée pour la construction de matériel ferroviaire comme les panneaux composites nid d'abeille d'alliage d'aluminium.

Dans la construction, les matériaux composites remplacent peu à peu les matériaux traditionnels, le génie civil utilise aussi des matériaux à structure sandwich pour construire des voûtes de grandes portées, des portes d'écluses, des tabliers de pont et des balcons pour habitat collectif, etc. (Castanié 2000). Un autre aspect important consiste en la possibilité d'inclure, en plus de la fonction structurale, de nombreuses autres fonctions : isolation thermique ou acoustique, amortissement vibratoire, tenue au crash, tenue au feu, furtivité, contrôle actif, etc. Ces nombreuses autres fonctions sont des points décisifs pour généraliser l'utilisation des matériaux composites à structure sandwich.

1.3. Amélioration des propriétés physiques et mécaniques des matériaux composites

1.3.1. Amélioration des propriétés physiques et mécaniques des matériaux composites à base de bois

L'utilisation de fibres de renforcement dans un matériau composite à base de bois peut aider à augmenter les propriétés physiques et mécaniques de celui-ci. Les fibres de renforcement les plus connues sont la fibre de verre et la fibre de carbone, mais il y a d'autres types de fibres de renforcement comme les fibres naturelles (coton, lin, chanvre, jute, etc.), les fibres synthétiques (*Kevlar*, *Aramid*, etc.) et les fibres animales (fil d'araignée, ver à soie, *attacus atlas*, *bombyx mori*, etc.). Le tableau 1.2 présente les principales propriétés des fibres de renforcement.

Tableau 1.2: Principales propriétés de fibres de renforcement communes (Bouffard et Amiotte 2011)

Fibre	Module d'élasticité (GPa)	Allongement à la rupture (%)	Module de rupture (MPa)	Masse volumique (kg/m ³)
Fibres synthétiques				
Fibre de verre (<i>E-Glass</i>)	72	3,0	2220	2540
Carbone (<i>Toray T300</i>)	230	1,5	3530	1800
Carbone (<i>Thorneel P120S</i>)	825	0,3	2350	1900
Aramide (<i>Kevlar 49</i>)	124	2,9	3620	1440
Fibres végétales				
Lin	58	3,27	13,40	1530
Chanvre	35	1,6	389	1070
Jute (<i>hessian</i>)	26,5	1,7	393-773	1440
Sisal	9-21	3-7	350-700	1450
Coton	5,5-12,6	7,5	287-597	1550
Fibres animales				
Araignée	7	30	600	
Ver à soie (<i>Attacus atlas</i>)	5	18	200	
Ver à soie (<i>Bombyx mori</i>)	16	15	650	

L'utilisation de fibres naturelles comme les fibres de renforcement de matériaux composites a augmenté en raison de leurs propriétés mécaniques et de leur performance environnementale car les fibres naturelles peuvent être facilement recyclables. Une des principales considérations dans l'utilisation des fibres naturelles ou des tissus de fibres naturelles est le niveau de torsion, lequel est important pour l'imprégnation de l'adhésif. Une augmentation du niveau de torsion produit une diminution des propriétés mécaniques (Goutianos et al. 2006).

Plusieurs expériences ont été réalisées pour améliorer les propriétés mécaniques des matériaux composites à base de bois. Xu et al. (1998b) ont utilisé les tissus de jute (*Corchorus spp*) et de bambou (*Phyllostachys pubescens*) comme fibre de renforcement dans la fabrication de panneaux contreplaqués de bois de meranti jaune (*Shorea spp*) collés avec un adhésif contenant du phénol-résorcinol-formaldéhyde. Les propriétés mécaniques comme le module d'élasticité, le module de rupture et le module de cisaillement des panneaux contreplaqués faits avec les fibres de renforcement augmentent par rapport aux panneaux sans renforcement. Pourtant les résultats ont démontré l'efficacité des fibres comme renforcement du matériau composite.

Abdul Khalil et al. (2010) ont développé un matériau composite à base de bois hybride pour étudier leurs propriétés mécaniques. Les résultats ont montré que le renforcement a amélioré plusieurs propriétés mécaniques et physiques du panneau contreplaqué. Xu et al. (1998a) ont aussi étudié l'effet de la longueur et l'orientation des fibres de charbon sur les propriétés mécaniques des panneaux contreplaqués. Les résultats ont démontré que le contreplaqué renforcé avec des fibres de carbone courtes et dans une orientation aléatoire présentent une amélioration des propriétés mécaniques (module de cisaillement et résistance à la flexion) par rapport au panneau contreplaqué sans renforcement.

Cai (2006) a évalué les propriétés physiques et mécaniques des panneaux MDF et PLO renforcés avec fibre de verre. Une couche mince de fibre de verre/résine a été collée sur chaque surface des panneaux agglomérés. Les résultats ont montré que la consolidation de la couche de fibre de verre/résine sur les surfaces du panneau MDF et PLO ont amélioré les propriétés mécaniques comme le module d'élasticité et le module de rupture, ainsi que

les propriétés physiques comme la résistance à l'adsorption d'eau et la résistance au gonflement de l'épaisseur des matériaux composites. Mohebbi et al. (2011) ont aussi évalué l'influence du renforcement avec un filet de métal et synthétique sur les propriétés mécaniques du panneau MDF. Les résultats ont révélé que le module d'élasticité et le module de rupture ont été augmentés significativement en raison du renforcement. Le MOR du matériau composite a augmenté de 105%.

Borysiuk et al. (2007) ont étudié la possibilité de renforcer un panneau de particules de trois plis avec de la fibre de verre. Trois différentes variations de déplacement du matériau de renforcement ont été étudiées. Les meilleurs résultats sur les propriétés mécaniques ont été obtenus par l'introduction du filet de fibre de verre sur la surface et entre les plis extérieurs et le pli intérieur du panneau de particules. De même, les propriétés physiques ont été améliorées avec le même déplacement du matériau de renforcement.

Bouffard et Amiotte (2011) ont évalué l'amélioration des propriétés mécaniques du matériau composite à base de bois en utilisant différents adhésifs et fibres de renforcement. Les résultats ont écarté l'usage des panneaux contreplaqués et des panneaux HDF comme substrat de lames de plancher d'ingénierie. Au contraire, les panneaux contreplaqués de peuplier faux-tremble (*Populus tremuloides Michx*) et hybrides (panneau contreplaqué de peuplier faux-tremble et panneau d'HDF) ont présenté des propriétés mécaniques intéressantes pour un substrat de lames de plancher d'ingénierie (Tableau 1.3). L'addition d'une fibre de renforcement aux matériaux composites à base de bois n'augmente pas les propriétés mécaniques des panneaux de peuplier faux-tremble.

Tableau 1.3: Propriétés mécaniques des panneaux renforcés d'HDF et de contreplaqué de peuplier faux-tremble (Bouffard et Amiotte 2011)

	Cohésion Interne (MPa)		Module d'élasticité (MPa)	
	PUR*	PVA**	PUR*	PVA**
HDF	0,58	0,67	2350	2654
HDF + fibre de verre	0,63	0,38	3326	2987
Peuplier	1,53	1,29	9730	9346
Peuplier + fibre de verre	1,02	0,44	8176	6814

*Polyuréthane, **Polyvinyle acétate

1.3.2. Amélioration des propriétés physiques et mécaniques des matériaux composites à base de bois à travers une structure sandwich

Plusieurs études ont été réalisées pour l'amélioration des propriétés physiques et mécaniques des matériaux composites à base de bois à travers des structures sandwich. Smulski et Ifju (1986) ont évalué les propriétés mécaniques d'un panneau HDF renforcé avec de la fibre de verre. Les résultats ont montré que le module d'élasticité et le module de rupture ont augmenté avec l'augmentation du volume du matériau de renforcement.

Kawasaki et al. (1999) ont aussi étudié les matériaux composites à structure sandwich. Les résultats ont montré que les propriétés mécaniques ont augmenté de façon significative par rapport au matériau sans renforcement. Le module de rupture et le module d'élasticité en direction parallèle du matériau composite ont augmenté deux et quatre fois par rapport au matériau sans renforcement.

Büyüksari et al. (2012) ont évalué les propriétés physiques et mécaniques du panneau MDF renforcé sur la surface avec des placages de bois compressés à différents niveaux de pression et de température (structure sandwich). Le module d'élasticité et le module de rupture des panneaux MDF renforcés ont augmenté par rapport au panneau MDF sans laminé. Ayırlımıs et al. (2009) ont aussi évalué les propriétés physiques et mécaniques du panneau MDF exposé au traitement thermique de la surface. Les résultats ont démontré l'amélioration des propriétés physiques comme la résistance au gonflement en épaisseur,

à l'adsorption d'eau et à l'expansion linéale, tandis que les propriétés mécaniques comme le module d'élasticité et le module de rupture ont diminué avec le traitement thermique de la surface. Kilic et al. (2009) ont aussi étudié la rigidité à la flexion du panneau MDF renforcé à la surface avec du chlorure de polyvinyle. Les résultats ont aussi montré l'efficacité du renforcement sur les propriétés mécaniques du matériau composite.

Biblis et Carino (2000) ont étudié des panneaux contreplaqués de bois de pin où était collé un composite de tissu en fibre de verre/résine polyester sur chaque surface du panneau. Les panneaux ont été faits avec trois ou cinq plis de bois collés avec une résine phénolique. Les résultats ont montré que le module d'élasticité et le module de rupture augmentent avec l'incorporation du composite de renforcement sur la surface des panneaux contreplaqués en direction longitudinale et tangentielle au fil de la couche de surface. Hse et al. (2012) ont aussi étudié les propriétés physiques et mécaniques d'un matériau composite à structure sandwich composé de contreplaqués comme peaux et d'un panneau de particules hybrides (particules de bois et polyéthylène recyclé) comme noyau. Les résultats ont confirmé l'amélioration des propriétés physiques et mécaniques du matériau composite avec l'utilisation de la structure sandwich.

1.4. Performance environnementale des matériaux composites

La problématique du changement climatique est devenue un thème important dans la vie quotidienne parce qu'il affecte les populations humaines et leur environnement à différentes échelles et selon plusieurs dimensions scientifiques, économiques et géopolitiques. La principale cause des changements climatiques demeure l'émission de gaz à effet de serre (GES) due aux activités humaines, en particulier la combustion des combustibles fossiles et la déforestation (Beauregard et al. 2012). Pourtant, la demande en information scientifique sur la performance environnementale d'un produit ou service est de plus en plus requise sur le marché. Les consommateurs sont davantage conscients des problèmes environnementaux dérivés d'un produit ou d'un service. Le développement d'un matériau composite à structure sandwich implique non seulement la détermination des propriétés physiques et mécaniques, mais également la caractérisation de la performance environnementale du matériau. Évaluer la performance environnementale

d'un matériau demande de quantifier et d'analyser tous les impacts environnementaux de chaque matériau et techniques utilisées pendant le cycle de vie du matériau (Jolliet et al. 2010).

1.4.1. L'analyse du cycle de vie

Pour réaliser une évaluation des impacts environnementaux, un certain nombre de méthodes d'évaluation ont été développées. L'analyse du cycle de vie (ACV) est une de ces méthodes, les premières études ACV ont été réalisées dans les années 60 (Belem 2005), lesquelles ont été orientées principalement vers la demande d'énergie dans les systèmes productifs. Ce type d'études a été réalisé plus souvent dans les années 70 à partir de la crise énergétique mondiale. En Europe, les premières études de comparaison écologique de produits ont été réalisées en 1974 en Suisse. L'Allemagne a été l'un des pays où l'ACV fut le plus développée dans les années 80 en raison des problèmes de déchets solides. Dans la deuxième moitié des années 80, l'ACV est devenue un outil très utilisé dans les domaines de production et de marketing (Belem 2005). Par conséquent, plusieurs études d'ACV ont été réalisées dans les mêmes domaines mais elles ont généré des résultats contradictoires. Cette situation a remis en question la fiabilité de l'approximation de l'ACV, générant ainsi une discussion intensive sur la méthodologie de l'ACV (Suppen et Van Hoof 2005).

L'ACV a été énormément développé depuis les années 1990 avec le processus de normalisation internationale. La méthodologie ACV, telle que présentée dans la norme internationale ISO 14040 : « Management environnemental - Analyse du cycle de vie - Principes et cadre » (ISO 2006a) et complétée par la norme ISO 14044 : « Management environnemental - Analyse du cycle de vie - Exigences et lignes directrices » (ISO 2006b) vise à évaluer les impacts environnementaux potentiels d'un produit, d'un service ou d'un système en relation à une fonction particulière. L'ACV fournit une analyse des impacts environnementaux compressive et quantitative d'un produit ou d'un service à travers leur cycle de vie. Cette analyse se fonde sur l'ensemble des ressources naturelles consommées et des substances émises dans l'environnement, en considérant toutes les étapes du cycle de vie du produit ou du service (figure 1.10). Pourtant, l'ACV analyse tous les impacts de

chaque matériau et techniques utilisées dans la fabrication, l'utilisation et l'élimination de ce produit ou service. Cette analyse permet d'identifier les points sur lesquels un produit peut être amélioré et elle contribue aussi au développement de nouveaux produits (Jolliet et al. 2010).

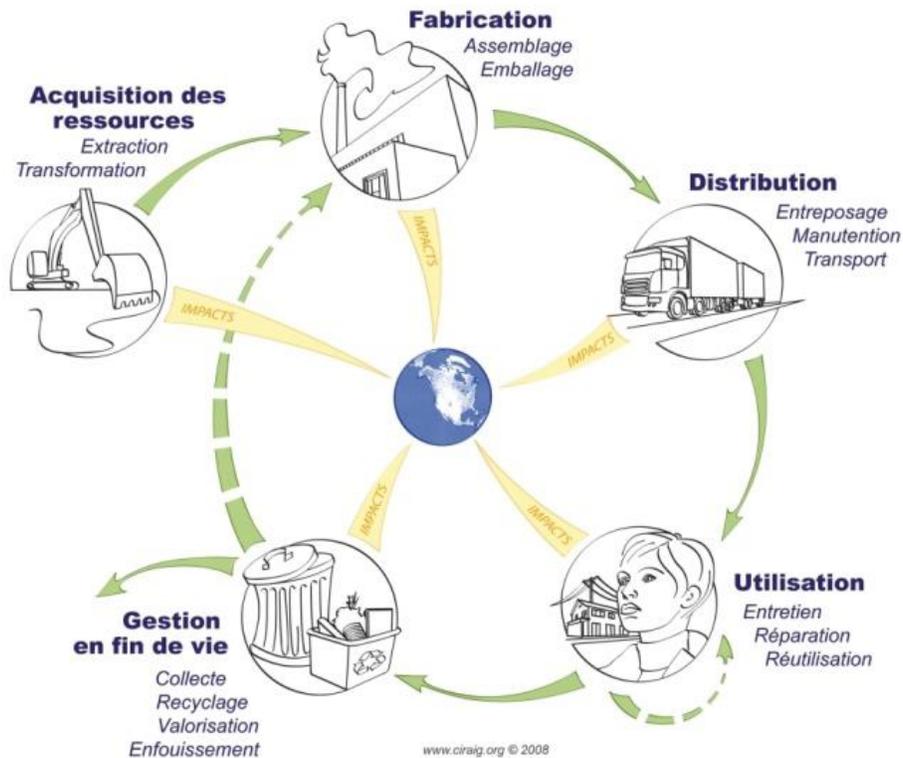


Figure 1.10: Cycle de vie d'un produit (CIRAIG 2005)

1.4.1.1. Phases de l'analyse du cycle de vie

L'ACV d'un produit s'effectue en quatre phases qui sont : (1) la phase de définition des objectifs et du champ de l'étude, (2) la phase de l'inventaire des émissions et des extractions liées au système, (3) la phase d'évaluation des impacts environnementaux, et finalement, (4) la phase d'interprétation des résultats obtenus (Jolliet et al. 2010). Comme on peut le voir dans la figure 1.11, les phases qui structurent l'ACV sont interactives entre

elles, ce qui représente une flexibilité dans le processus d'évaluation fourni par cette méthodologie.

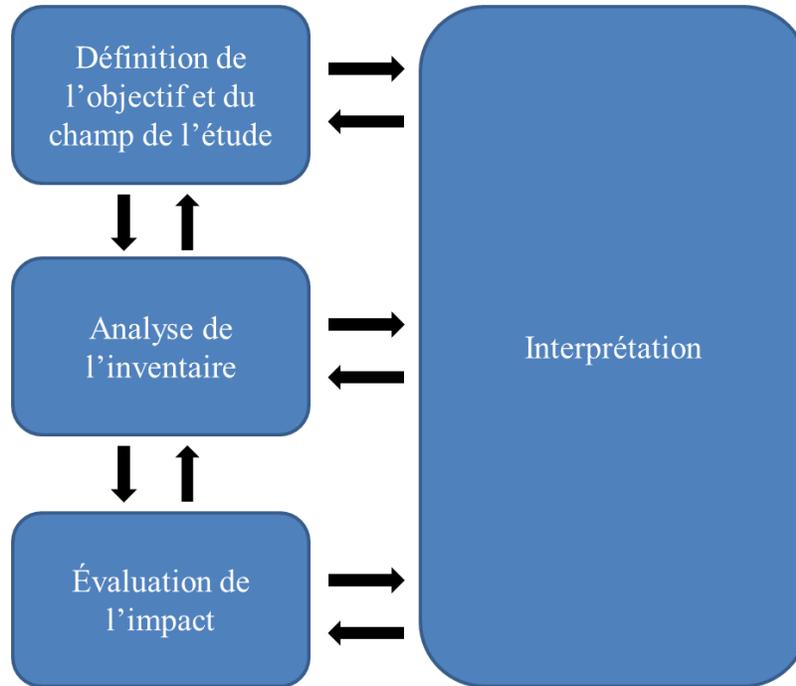


Figure 1.11: Phases d'une analyse du cycle de vie (ISO 2006a)

La phase de *définition des objectifs et du système* permet de poser le problème, de définir les objectifs et le champ de l'étude. Cette phase détermine une série d'éléments cruciaux comme la fonction du système, l'unité fonctionnelle à laquelle les émissions et les extractions seront ensuite rapportées. Elle définit également les limites du système considéré. Dans cette phase, la raison de l'étude et la façon dont celle-ci sera conduite sont clairement définies. Cette phase paraît triviale, mais elle est de fait essentielle pour la qualité de l'étude (Jolliet et al. 2010). L'application envisagée, la justification de l'étude et le public cible doivent être clairement déterminés puisqu'ils vont fixer l'amplitude et la profondeur de l'étude.

D'après la norme ISO 14040 (2006a), les principaux éléments à définir dans le champ de l'étude sont : les systèmes, les fonctions du ou des systèmes, l'unité fonctionnelle et les limites ou frontières de chaque système, les règles d'affectation, les hypothèses, les exigences de qualité des données, les limitations, la méthodologie d'évaluation de l'impact du cycle de vie et les types d'impact, l'interprétation à utiliser et le type de revue critique.

L'unité fonctionnelle (UF) est un élément fondamental pour l'ACV. La comparabilité de deux systèmes impose que l'unité fonctionnelle remplisse exactement les mêmes fonctions. Elle sera utile lors de l'inventaire, car tous les flux entrants ou sortants du système y seront rapportés. Les limites ou frontières du système déterminent les éléments qui doivent être inclus dans l'étude. Les limites doivent être en accord avec la fonction. Selon ISO 14044, la frontière du système est l'ensemble de critères qui spécifient quels processus élémentaires font partie du système de produits. Dans la pratique, la réalisation d'une étude ACV implique l'application de trois règles de définition des limites du système. La première indique que les limites doivent recourir à la même réalité fonctionnelle dans les différents scénarios; la deuxième précise d'exclure la quantification des entrants et sortants qui ne changeront pas de manière significative les résultats de l'étude, le pourcentage étant préalablement fixé; et enfin, la troisième mentionne que les étapes identiques dans les différents scénarios peuvent être exclues à condition que les flux de référence affectés par ces processus soient strictement égaux. Les hypothèses doivent être clairement présentées. L'analyse critique du contenu du champ de l'étude doit permettre d'identifier les limitations de l'étude.

La phase de *l'inventaire des émissions et des extractions* quantifie les émissions polluantes dans l'air, l'eau et le sol ainsi que les extractions des matières premières renouvelables ou non renouvelables (Jolliet et al. 2010). Cette étape consiste en la quantification des flux de matières, d'énergie et polluants intrants et/ou extrants du système (ressources extraites, substances émises, etc.) au cours du cycle de vie du produit. Deux approches peuvent être utilisées lors de l'inventaire, à savoir, l'approche processus et l'approche input-output (I/O). Si l'approche processus est utilisée, les quantités de matière ou énergie par unité fonctionnelle sont multipliées par des facteurs d'émissions

ou d'extraction par unité d'intrant utilisée ; si l'approche I/O est utilisée alors les dépenses par unité fonctionnelle sont multipliées par des facteurs d'émissions par unité monétaire dépensée (Jolliet et al. 2010). La réalisation et l'analyse de l'inventaire se déroulent en plusieurs étapes : la préparation de la collecte des données, la collecte des données, la validation des données, la mise en rapport des données avec l'unité fonctionnelle et l'agrégation des données au niveau du cycle de vie.

La phase de *l'analyse de l'impact environnemental* évalue l'impact sur l'environnement des émissions et extractions inventoriées dans la phase de l'inventaire. Les différentes étapes de cette analyse sont la classification des émissions dans les différentes catégories d'impact, la caractérisation intermédiaire des impacts et la caractérisation des dommages (Jolliet et al. 2010). Il existe plusieurs méthodes d'analyse de l'impact, lesquels réalisent une caractérisation intermédiaire (*midpoint*) et/ou caractérisation de dommages (*endpoint*) des émissions et des extractions. Pour l'agrégation des résultats de l'inventaire d'émission et d'extraction, il existe plusieurs méthodes d'analyse d'impact intermédiaire (impact direct) ou de dommage. Jolliet et al (2010) recommandent l'utilisation par défaut de deux à trois méthodes d'analyse d'impact en parallèle. L'utilisation par défaut d'au moins deux méthodes d'analyse d'impact permet de tester la robustesse des résultats obtenus. Ces méthodes ont été élaborées selon les connaissances scientifiques acquises pour des régions données entre les principales méthodes d'origine européenne dont ReCiPe, IMPACT 2002+, Impact World+, Ecoindicateur 99 et CML alors que les méthodes TRACI and LUCAS sont d'origine Nord-Américaine. Au Japon les méthodes utilisées sont LIME, LIME2 et JEPIX (Figure 1.12).

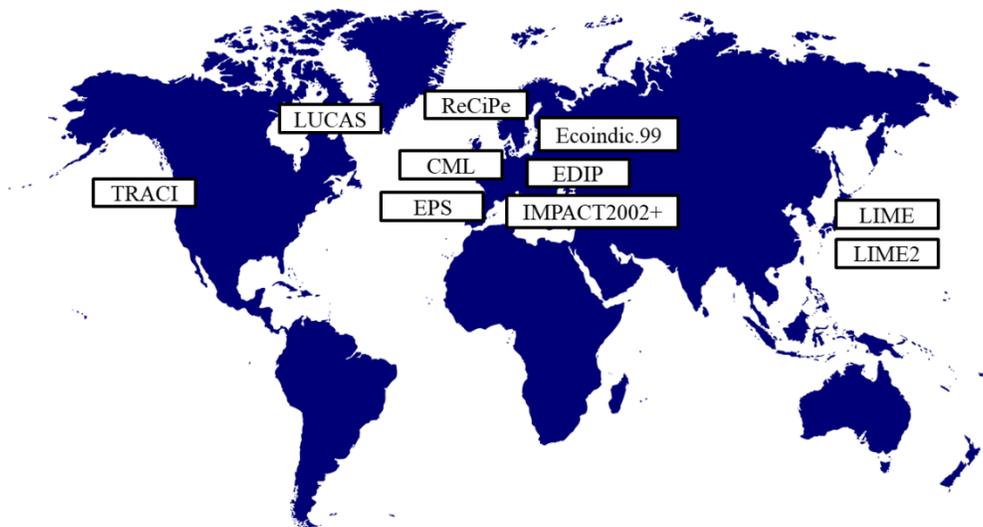


Figure 1.12: Contexte géographique des méthodes d'analyse d'impact (d'après Margni 2014)

Cette troisième étape de l'ACV relie les données quantitatives obtenues lors de l'inventaire des dommages environnementaux causés par les substances inventoriées. Pour ce faire, les résultats de l'inventaire sont d'abord regroupés par similarité d'effets (exemple : substances influençant la réduction de la couche d'ozone) et classés dans les catégories correspondantes d'impacts intermédiaires (*midpoint categories*). Une étape supplémentaire permettra de relier les catégories intermédiaires aux catégories de dommages (*endpoint categories*). En général, l'étude d'impact peut se faire en caractérisant que les catégories intermédiaires ou si on souhaite continuer la caractérisation des dommages. Certains scientifiques arrêtent la caractérisation au niveau intermédiaire car l'extrapolation aux dommages peut amener un degré d'incertitude supérieur dans l'analyse.

Finalement, la phase *d'interprétations des résultats obtenus* est en fonction des objectifs retenus. La phase d'interprétation compile toutes les informations obtenues dans les phases précédentes de l'ACV pour former un jugement définitif. Le résultat de l'ACV offre seulement une aide à la décision, donc il fait partie du processus de prise de décision il est, peut-être, nécessaire d'utiliser un autre outil social ou économique pour prendre une décision finale.

Cette phase permet d'identifier les étapes du cycle de vie sur lesquelles il faut intervenir pour réduire l'impact environnemental étudié. Cette phase permet d'évaluer la robustesse des résultats et d'analyser en détail les incertitudes et finalement de tirer des conclusions, expliquer les limites de l'étude et apporter des recommandations basées sur les résultats. Les résultats devraient prendre en considération les éléments suivants :

- La nature des sélections et les hypothèses sont subjectives. Les conclusions doivent être encadrées par rapport aux limites établies pour le système, la source de données sélectionnées et les catégories d'impacts utilisées.
- Les résultats de l'étude d'ACV présentent les impacts potentiels.
- La précision et la fiabilité des résultats sont affectées par la qualité des données utilisées.
- Le temps et le cadre de l'étude dépendent du personnel et des ressources financières disponibles.
- La même interprétation inclut des étapes d'évaluation et comprend des critères subjectifs et non scientifiques.

1.4.2. Détermination des impacts environnementaux des matériaux composites à base de bois

Les matériaux composites ou panneaux agglomérés à base de bois sont l'un des produits les plus largement consommés en raison de leurs importantes propriétés physiques et mécaniques. La production de matériaux composites à base de bois constitue une part importante de l'industrie du bois au Québec. Le fait que des matériaux composites soient faits à base de bois est une caractéristique environnementale importante d'abord, car le bois est un matériau qui peut être considéré comme renouvelable. De plus, le bois est constitué à travers la photosynthèse laquelle permet de synthétiser de la matière organique à partir du CO₂ atmosphérique. Par conséquent, l'arbre réalise un stockage de carbone pendant sa croissance. Pourtant, le bois et les produits de bois contiennent du carbone stocké qui est retenu dans le matériel jusqu'à sa libération à travers des mécanismes comme la combustion, la désintégration bactérienne ou par des champignons ou la

consommation par les insectes (Buchanan et Levine 1999). L'utilisation de 1 m³ de bois permet de retirer de l'atmosphère 0,9 tonne de CO₂ (stockage de carbone). En plus, les émissions de CO₂ dues à l'utilisation du bois comme source d'énergie dans la fabrication des panneaux agglomérés à base de bois peuvent être considérées comme neutres en carbone car la quantité de CO₂ libérée peut être égale à la séquestration du CO₂ lors de la recroissance de la biomasse. Différentes études ont attribué un potentiel de réchauffement global égal à zéro par le CO₂ généré par la combustion de la biomasse (CO₂ biogène). Des études d'analyses du cycle de vie montrent une réduction des GES de 70 à 95% par rapport aux combustibles fossiles lorsque la biomasse forestière est utilisée comme énergie et carburant. En plus, l'utilisation de déchets de biomasse peut amener une réduction supérieure à 100% grâce au fait qu'elle permet d'éviter les émissions de méthane (enfouissement). L'émission de méthane (CH₄) est 25 fois plus impactant que l'émission de CO₂ (Stephen et Wood-Bohm 2016).

Par contre, la production des panneaux agglomérés à base de bois implique une grande consommation d'additifs comme les adhésifs à base de pétrole (urée formaldéhyde (UF) et phénol formaldéhyde (PF)) dans leur fabrication. Cela occasionne des émissions de composés organiques volatiles (COV) comme le formaldéhyde. Ces émissions ont comme conséquence des impacts négatifs sur la qualité des écosystèmes et sur la santé humaine (Irigaray et al. 2007; Gminski et al. 2010). Différents pays ont maintenant une législation limitant l'émission de formaldéhyde dans les matériaux composites à base de bois. Les industriels et les chercheurs ont beaucoup investi pour tenter de réduire les émissions de formaldéhyde en remplaçant principalement l'utilisation d'urée formaldéhyde comme adhésif. Différentes études ont confirmé que la consommation d'adhésifs à base de pétrole comme l'urée formaldéhyde et le phénol formaldéhyde est l'une des sources des principaux impacts environnementaux dans la production de panneaux agglomérés à base de bois (Dos Santos et al. 2014; Rivela et al. 2006). Wilson (2010) a réalisé un inventaire des extractions et des émissions de résines à base de formaldéhyde usées dans la fabrication de panneaux agglomérés à base de bois comme UF, PF, mélamine urée formaldéhyde (MUF) et phénol résorcinol formaldéhyde (PRF). Les résultats ont montré que l'empreinte carbone (émissions de gaz à effet de serre vers l'atmosphère) variait selon le type de résine. La MUF a présenté l'empreinte carbone la plus élevée, suivie par UF,

PF et finalement, PRF. L'usage d'adhésifs plus écologiques dans la fabrication des produits de bois peut diminuer la trace environnementale principalement en réduisant les émissions de formaldéhyde et des autres COV comme dans le cas de l'utilisation d'une résine à base de tannins d'écorce de pin (Cobut 2014), d'une résine de noix de cajou (Kim 2010) ou d'une résine à base de tannins de féculé de maïs et quebracho (González-Garcia et al. 2011). Cependant, l'utilisation d'adhésifs plus écologiques requiert des études pour vérifier les propriétés physiques et mécaniques des panneaux agglomérés à base du bois et leurs coûts de production respectifs au niveau industriel (Dos Santos et al. 2014).

Certaines études ont été réalisées pour évaluer les impacts environnementaux des différents types de panneaux agglomérés à base de bois. Les panneaux HDF et MDF ont été largement étudiés (Rivela et al. 2006; Wilson 2008; Gonzalez-Garcia et al. 2009; Zeller et al. 2015; Kouchaki-Penchah et al. 2016; Piekarski et al. 2017), ainsi que les PLO (Kline 2005; Puettmann et al. 2013a; Chan 2012) et les panneaux contreplaqués (Puettmann et al. 2013b; Chan 2012). Les différentes études sur les impacts environnementaux des matériaux composites à base de bois identifient les points chauds (*hotspots*) dans le cycle de vie des panneaux. Parmi les principaux, on peut mentionner l'utilisation de résine (urée formaldéhyde ou phénol formaldéhyde), la consommation d'énergie, la consommation de copeaux de bois, le transport de copeaux de bois à l'usine, la préparation des fibres, etc. Ces résultats (*hotspots*) peuvent varier en fonction de la réalité de chaque étude.

L'usage des déchets de biomasse (bois et écorce) comme source de combustible dans la fabrication des panneaux agglomérés à base de bois joue un rôle environnemental favorable car la combustion de la biomasse génère des émissions de CO₂ biogène, lequel est considéré neutre pour le réchauffement climatique selon l'Agence de protection environnementale des États-Unis (Wilson 2008). Selon cette approche, les émissions de dioxyde de carbone produites par la combustion de combustibles ligneux sont considérées comme étant égales à l'absorption de gaz carbonique par la forêt durant la croissance des arbres.

En plus, les panneaux agglomérés faits de résidus de bois comme les panneaux MDF et ceux faits de particules conservent le CO₂ en permanence pendant longtemps. Les panneaux agglomérés faits de résidus de bois ont plus de capacité de stockage de carbone que l'émission de carbone dans le processus de production (Nebel et al. 2011). Rivela et al (2006) ont comparé la production de chaleur générée par la biomasse (copeaux de bois) utilisée comme combustible par rapport à la production de chaleur générée par le gaz naturel liquéfié. Les résultats ont montré que l'utilisation de gaz naturel contribue davantage au changement climatique que l'utilisation de résidus de bois (biomasse). Kim et Song (2014) ont aussi évalué les bénéfices environnementaux de la production de panneaux des particules et production d'énergie en utilisant des résidus de bois. Les résultats ont montré que la production de panneaux de particules faits à partir de résidus de bois produit 428 kg CO₂-eq de moins par rapport à la production de panneaux faits à partir de bois frais. De même, la production d'énergie en utilisant des résidus de bois produit 154 kg CO₂-eq de moins par rapport à la production d'énergie à partir de la génération d'électricité et de chaleur.

1.4.3. Détermination des impacts environnementaux des matériaux composites à structure sandwich

Évaluer et rechercher des impacts environnementaux d'un panneau composite est chaque fois plus important pour l'industrie. En réalité, le décideur ne prend pas seulement en compte les propriétés physiques et mécaniques et les coûts de production d'un panneau composite pour différentes applications, mais aussi les impacts environnementaux qu'occasionne ce panneau composite pendant son cycle de vie. L'usage de fibres naturelles dans la fabrication de panneaux composites comme renforcement a été largement développé. L'utilisation des fibres naturelles comme le lin, le jute, le sisal ou les fibres du bois peuvent donner des avantages sur les fibres synthétiques comme leur faible coût, leur faible masse volumique et leur caractère renouvelable. Cependant, la nature de ces fibres n'est pas synonyme d'un impact environnemental mineur quand l'étape de fabrication a seulement été étudiée. Cela s'explique parce que pendant la phase de culture, l'usage de pesticides et d'autres produits chimiques peuvent représenter des impacts négatifs sur l'environnement (Xu et al. 2008) ou parce que dans les catégories

d'impact lié aux activités agricoles comme l'utilisation des terres et écotoxicité d'eau douce, les impacts environnementaux ont été plus élevés (Duflou et al. 2014).

Plusieurs études ont été réalisées pour déterminer les impacts environnementaux des panneaux composites en utilisant la méthodologie d'analyse du cycle de vie (Batouli et al. 2014; Song et al. 2009; Xu et al. 2008; Umair 2006; La Rosa et al. 2014). La Rosa et al. (2014) ont identifié que l'usage de résine époxy, dans la fabrication d'un panneau composite à structure sandwich, est le principal contributeur des impacts environnementaux, responsable d'environ 85% du total, voire plus. Umair (2006) détermine que l'utilisation de bois de balsa comme noyau dans un panneau composite à structure sandwich a été la meilleure alternative environnementale par rapport à l'utilisation de d'autres matériaux comme le chlorure de polyvinyle (PVC) ou l'acier. Selon l'ACV, les panneaux faits avec des polymères à base d'un matériau naturel présentent des résultats favorables en termes d'impacts environnementaux et de consommation d'énergie par rapport à un panneau fait à base de produits dérivés du pétrole, mais les résultats dépendent du système et des limites du système considéré dans l'étude (La Rosa et al. 2014). Xu et al. (2008) ont démontré que l'utilisation de fibres de bois comme renforcement dans un panneau composite présente des avantages environnementaux par rapport à l'utilisation du polypropylène.

1.4.4. Détermination des impacts environnementaux de l'aluminium

Comme il a été mentionné précédemment, les matériaux composites à structure sandwich utilisent différents types de matériaux comme revêtements ou peaux dont les métaux. Les impacts environnementaux occasionnés pour la fabrication des métaux spécialement de l'aluminium ont aussi été étudiés (Aluminium Association 2013; Norgate et al. 2007; Seigné-Itoiz et al. 2014; Liu et Müller 2012; Hong et al. 2012; Zhang et al. 2016). L'aluminium est le deuxième métal le plus utilisé après l'acier. Il est largement utilisé partout dans le monde dans une multitude d'applications et d'industries dont l'industrie du transport, la construction, l'emballage et l'ingénierie électrique et ce, en raison de sa grande versatilité (Liu et Müller 2012). Le cycle de vie typique de produits d'aluminium commence par l'extraction de ressources naturelles et se termine par la disposition ou le

recyclage des produits (Figure 1.13). Il existe deux manières distinctes de produire l'aluminium : la première est à partir de la bauxite (ressource naturelle) et l'autre est à partir de rebuts ou de débris d'aluminium. Théoriquement, les métaux faits de ces deux ressources différentes partagent les mêmes propriétés et exécutent les mêmes fonctions. D'un point de vue d'empreinte environnementale cependant, il existe des différences significatives (Association d'aluminium 2013).

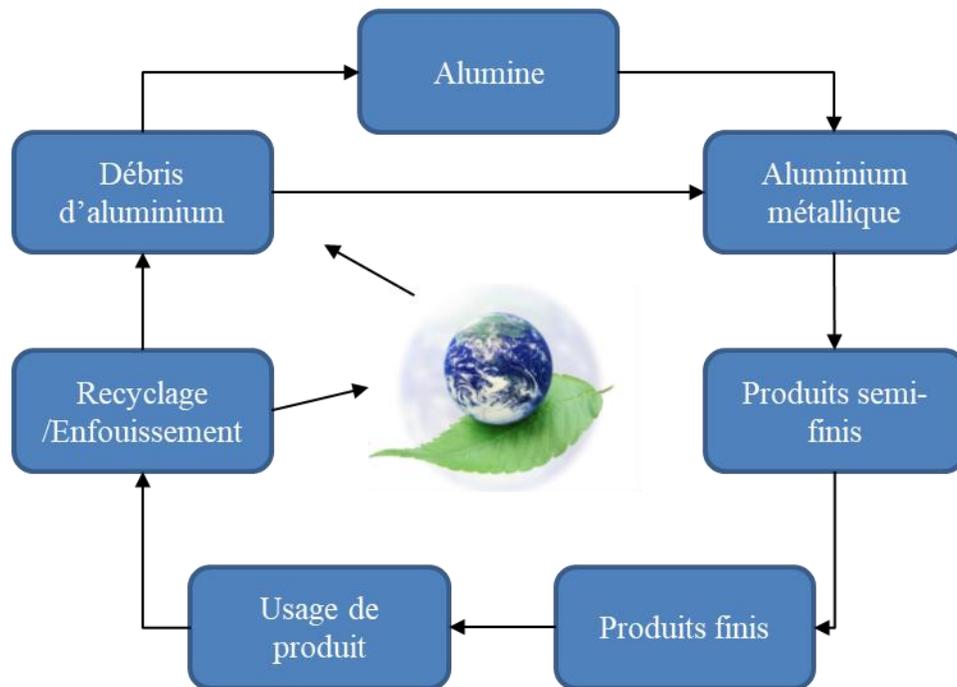


Figure 1.13: Cycle de vie de produits d'aluminium (Association d'aluminium 2013)

L'aluminium métallique est extrait de l'alumine (oxyde d'aluminium, Al_2O_3 , H_2O) qui provient lui-même de gisements de bauxite par un procédé de réduction électrolytique dans un bain en fusion composé de fluorure d'aluminium et de cryolithe à une température approximative de $960^{\circ}C$. Un équivalent de 0,2 - 0,25 tonne d'aluminium est normalement produit pour chaque tonne de bauxite. Outre le procédé de réduction électrolytique, le secteur de l'aluminium primaire comprend plusieurs activités connexes incluant la production de l'alumine métallurgique, la fabrication des anodes en carbone, et la calcination du coke de pétrole. Toutes ces activités nécessitent l'utilisation d'électricité,

de carburants et de matières premières (p.ex., coke de pétrole, bauxite, fluorure d'aluminium, cryolite, brai de goudron, etc.) qui entraînent des émissions de polluants atmosphériques. Le dioxyde de soufre (SO₂), les matières particulaires (PT), les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), les fluorures totaux et les oxydes d'azote (NO_x) en sont les principaux. Les processus de production d'aluminium génèrent des émissions gazeuses et des déchets en quantités importantes. La conversion de la bauxite à l'alumine et la transformation de l'alumine à l'aluminium métallique sont deux processus qui requièrent l'utilisation intensive d'énergie. Pourtant, il existe une préoccupation croissante due aux émissions dans l'atmosphère des centrales électriques qui génèrent l'énergie. En plus, la génération de sous-produits ou déchets comme la boue rouge ou les émissions de dioxyde de carbone sont inévitables pendant la production d'aluminium primaire (Tan et Khoo 2005).

L'impact environnemental de la production de l'aluminium est important principalement en raison de l'érosion naturelle et de la haute consommation d'énergie pour l'extraction de la bauxite, laquelle demande plus d'énergie que pour les autres métaux et cause de grande quantité d'émissions de gaz à effet de serre (Norgate et al. 2007). Le progrès constant des activités reliées à la réutilisation et au recyclage dans l'industrie des métaux permet un système plus durable de production et de consommation propre grâce à la réduction des exigences d'énergie et de matériaux, à la réduction des émissions et de la dégradation du sol associée aux activités dans la mine (Ciacci et al. 2014). Ding et al. (2012) ont déterminé que la consommation d'énergie pour la production d'aluminium recyclé en couvrant le transport, le prétraitement et la refusion de rebut équivaut à moins de 5% de la consommation d'énergie pour la production d'aluminium de première fusion. Zhang et al. (2016) indiquent que plus du 94% des impacts potentiels dans le réchauffement climatique et dans l'épuisement de ressources fossiles peuvent être évités grâce à l'utilisation d'aluminium recyclé.

1.5. Les applications potentielles des matériaux composites à structure sandwich développés

Les applications des matériaux composites à structure sandwich ont un vaste champ d'utilisation comme décrit précédemment. Pourtant, la détermination des applications d'un matériau composite à structure sandwich est une partie importante dans le processus de développement d'un matériau. Le projet de recherche implique la détermination des applications potentielles des matériaux composites à structure sandwich développés.

1.5.1. La recherche qualitative

L'histoire de la recherche qualitative remonte aux années 1920. Les anthropologues et les sociologues ont été les premiers à mener des recherches sur des phénomènes humains dans leur environnement naturel et d'un point de vue holistique. Depuis les années 1950, les techniques de cueillette de données qualitatives comme les entretiens et les focus groups ont été utilisées pour le marketing. C'est à partir des années 1990 que les chercheurs en santé se sont approprié ces méthodes (Aubin-Auger et al. 2008).

La recherche qualitative est largement utilisée par les scientifiques et les chercheurs qui étudient le comportement humain et les habitudes. La recherche qualitative est parfois définie en référence ou en opposition à la recherche quantitative. En réalité, il n'y a pas d'opposition mais une complémentarité entre les deux, car elles n'explorent pas les mêmes champs de connaissance. La recherche qualitative ne cherche pas à quantifier ou à mesurer, elle analyse des informations non numériques ou verbales (paroles, actions, postures, idées, croyances, etc.) pour explorer et comprendre des phénomènes humains complexes (Aubin-Auger et al. 2008). De plus, la recherche qualitative utilise différentes techniques de collecte de données comme l'observation, les enquêtes, les entrevues et les documents afin de trouver des explications et des thèmes pour exprimer une compréhension sur un sujet.

La recherche qualitative, quant à elle, comprend différents types de recherches qui peuvent être différenciées par les hypothèses théoriques de départ. Flick (2012) indique que ces positions théoriques peuvent être résumées en trois points : l'interactionnisme

symbolique, l'ethnométhodologie et le structuralisme. L'interactionnisme symbolique s'intéresse aux significations subjectives que les individus donnent à des objets, il est intéressé par les processus d'interaction et est basé sur le symbolisme des actions sociales. L'ethnométhodologie s'intéresse aux problèmes quotidiens et à la façon dont ils sont produits, c'est-à-dire qu'elle est intéressée par la façon dont les personnes produisent des processus d'interaction sociale. Le structuralisme est basé sur les processus inconscients, tant du point de vue psychologique que social (Hernandez 2014).

Selon Morse (1994), les méthodologies utilisées dans la recherche qualitative peuvent être classées en : phénoménologie (cette méthodologie met l'accent sur l'individu et l'expérience subjective), ethnographie, théorie ancrée (cette méthodologie essaie de découvrir des théories, des concepts, des hypothèses et des propositions à partir directement des données), ethnométhodologie, recherche-action et enfin, méthode biographique.

1.5.1.1. Caractéristiques de la recherche qualitative

La recherche qualitative présente certaines caractéristiques qui l'identifient : les chercheurs s'intéressent aux expériences et aux données dans un environnement naturel de façon à laisser place aux particularités de ces mêmes expériences (Flick 2011). Une autre caractéristique essentielle de la recherche qualitative est qu'il n'y a pas d'abord un concept clair ou une hypothèse sur le sujet d'étude. Les concepts et les hypothèses sont formulés pendant la recherche même.

Selon Denzin et Lincoln (2012), il existe cinq étapes reliées entre elles dans le processus de recherche qualitative : les mêmes enquêteurs, les paradigmes sur lesquels se base leur étude, les stratégies de recherche, les méthodes de collecte et d'analyse des données empiriques et l'interprétation. La première étape est d'être centrée sur l'enquêteur (sa culture, son sexe, sa race, sa classe, et ses expériences de vie). La façon dont le chercheur fait face à l'objet d'étude sera déterminée par le paradigme de qui le fait. Il existe quatre paradigmes fondamentaux dans la recherche qualitative : le positivisme, le constructivisme-interprétatif, le critique, et le féministe. La troisième phase fait référence à la stratégie de recherche qui commence avec le dessin de la même recherche. Le dessin

doit contenir un ensemble de directives qui relient les paradigmes théoriques par rapport à la stratégie de recherche et il doit aussi contenir les méthodes d'obtention du matériau empirique pour la phase d'interprétation. La prochaine étape fait référence aux méthodes de collecte de données comme les entrevues, les observations et l'analyse de documents, de matériaux visuels et de l'expérience personnelle propre. La dernière étape est l'interprétation qui, dans le cas de la recherche qualitative, est un processus constructif.

1.5.2. La théorie ancrée (*Grounded theory*)

Cette théorie consiste en une méthodologie qui tente de développer une théorie basée sur la collecte et l'analyse systématique des données empiriques, sans considérer au début une théorie ou une hypothèse initiale (Hernández 2014). Cette théorie a été énoncée par Glaser et Strauss (1967). Initialement cette théorie a été utilisée dans le champ de la sociologie, mais elle a peu été utilisée dans d'autres disciplines, comme les soins primaires, le marketing et l'éducation. Actuellement, elle a une diffusion mondiale. La théorie ancrée est une méthodologie systématique mais flexible, conçue pour aider à l'élaboration de modèles explicatifs et de fond, fondés sur des données empiriques pertinentes (Hutchison et al. 2010). La principale différence par rapport à d'autres méthodologies qualitatives est qu'elle montre un grand intérêt pour le développement d'une théorie basée sur les données du travail sur le terrain (entretiens). La théorie ancrée utilise l'analyse inductive des données quantitatives pour construire une théorie déterminée sur l'objet de l'étude. Hutchison et al. (2010) ont identifié un certain nombre de caractéristiques communes qui représentent les principes sous-jacents de la méthodologie: c'est un processus itératif, l'échantillonnage vise la génération théorique, la création de codes analytiques et de catégories proviennent des données elles-mêmes, elle doit faire avancer le développement théorique tout le long, elle doit faire une comparaison systématique et enfin, il doit y avoir une preuve de densité ou de profondeur théorique aux observations présentées et à la saturation théorique. Entre autres caractéristiques de la théorie ancrée, mentionnons qu'il n'existe pas de revue de littérature au préalable, les utilisateurs doivent s'astreindre à suspendre leurs acquis et leurs connaissances, les résultats sont ancrés dans les données, il n'existe pas un aller-retour constant ou un continuum entre la collecte et l'analyse des

données et enfin, on ne peut pas définir au préalable le nombre d'entretiens qui seront menés (Hennebo 2009).

Glaser et Strauss (1967) incorporent le critère de la saturation théorique. La saturation détermine quand arrêter d'échantillonner les différents groupes de pertinence d'une catégorie. Selon ce concept, l'échantillonnage doit s'arrêter lorsqu'il n'existe pas de nouvelles données à travers lesquelles de nouveaux problèmes peuvent être développés. Les chercheurs devraient être clairs pour expliquer comment atteindre la saturation et quels problèmes ont été rencontrés dans le recrutement des participants (O'Reilly et Parker, 2012). En saturation, la suffisance de l'échantillon n'est pas déterminée en fonction uniquement du nombre de participants mais aussi de l'adéquation des données. Mason (2010) expose différents critères pour atteindre la saturation en tant qu'hétérogénéité de la population soit: le nombre de critères de sélection, les groupes d'intérêt particuliers nécessitant une étude intensive, les échantillons multiples dans une étude, les types d'utilisation des méthodes de collecte de données, le budget et les ressources disponibles, la portée de l'étude, la nature du sujet et la qualité des données.

Le processus d'analyse de données sur lequel repose la théorie ancrée s'appelle codage théorique. L'interprétation des textes à partir des transcriptions des sources de données est importante pour ensuite identifier les données à analyser et à codifier. Le codage est une activité incontournable pour les chercheurs qui analysent des données qualitatives. Il existe deux approches de codage : *a priori*, dans lequel la grille de codage se définit à partir de la littérature et le codage *a posteriori* dans lequel la grille de codage ou d'analyses est construite à partir des données.

Il existe trois types de codage : ouvert, axial et sélectif (Strauss et Corbin 1990). Le premier permet de codifier les données en fonction des catégories émergentes, c'est à dire que le chercheur commence à former des concepts avec les données. Le résultat du codage ouvert est une liste de codes et de catégories. L'étape suivante dans le codage est le codage axial à travers lequel se filtrent les catégories émergentes du codage ouvert en utilisant une analyse de fréquence des références. La codification axiale permet la réorganisation de l'information en créant des nouvelles relations entre les concepts ou les catégories.

Finalement la codification sélective permet de sélectionner une catégorie centrale autour de laquelle les autres catégories sont intégrées ou regroupées.

Les critères pour déterminer une catégorie centrale sont qu'elle doit être centrale, c'est-à-dire que toutes les autres catégories doivent avoir une relation avec celle-ci, elle doit apparaître fréquemment dans les données, elle doit être logique et cohérente, le nom ou la phrase utilisé pour décrire la catégorie centrale doit être suffisamment résumé et enfin, la théorie peut augmenter sa puissance explicative.

En résumé, dans le codage ouvert, l'analyste se préoccupe de générer les catégories et les propriétés, et cherche ensuite à déterminer la façon dont elles varient dans leur gamme dimensionnelle. Dans le codage axial, les catégories sont construites systématiquement et sont liées aux sous-catégories. Cependant, seulement lorsque les principales catégories sont finalement intégrées pour former un cadre théorique, les résultats de la recherche acquièrent la forme de théorie. Le codage sélectif est le processus d'intégration et de raffinement des catégories. Le processus d'analyse se termine lorsqu'il atteint le point de saturation mentionnée ci-dessus (Hernández 2014).

Chapitre 2 Objectifs

L'objectif général de ce travail de recherche consiste à développer un matériau composite à structure sandwich en prenant en compte simultanément plusieurs critères techniques, économiques et environnementaux.

Les principaux objectifs spécifiques sont :

1. Développer quatre différentes alternatives de matériaux composites à structure sandwich, déterminer leurs principales propriétés physiques et mécaniques et les comparer au matériau composite alvéolé d'alliage d'aluminium.
2. Estimer les coûts de production des alternatives du matériau composite à structure sandwich au niveau industriel.
3. Déterminer la performance environnementale des alternatives du matériau composite à structure sandwich à l'aide de l'évaluation des impacts environnementaux par une analyse du cycle de vie.
4. Déterminer des applications potentielles au matériau composite à structure sandwich en utilisant une méthodologie de recherche qualitative sur la base des propriétés physiques et mécaniques, les coûts de production et la performance environnementale du matériau composite à structure sandwich.

Chapitre 3 Rétrospective méthodologique

Ce chapitre a été écrit afin de fournir les informations complémentaires qui réfèrent aux matériaux et à la méthodologie utilisée dans cette thèse. Cette méthodologie a été détaillée par la suite dans chacun des articles présentés. Ce chapitre vise à renforcer la cohérence des résultats présentés aux chapitres 4, 5, et 6.

La méthodologie aborde chacun des critères utilisés dans le développement du matériau composite à structure sandwich. Premièrement, la caractérisation technique a été réalisée à travers différents essais normalisés, tandis que l'estimation des coûts de production a été obtenue en utilisant l'approche de modélisation des coûts de Wakeman et Månson (2004). Ensuite, les résultats des essais préliminaires et l'estimation des coûts de production ont servi à écarter des hypothèses préliminaires. Enfin, la méthodologie de recherche qualitative basée sur la théorie ancrée de Glaser and Strauss (1967) a été utilisée pour déterminer les applications potentielles du matériau composite à structure sandwich.

3.1. Essais préliminaires

Ce travail de recherche a d'abord impliqué une recherche exploratoire des matériaux composites existants sur le marché qui pourraient potentiellement servir comme substrat dans la fabrication d'un plancher d'ingénierie. À cette fin, comme premier axe de ce travail préliminaire, une recherche sur internet de produits commerciaux a été réalisée. Ce travail a dirigé la recherche vers différents sites web mis en ligne par des entreprises de fabrication ou de distribution de produits. Cette recherche sur le web a permis de répertorier de nombreux produits composites pouvant servir de substrats aux lames de plancher d'ingénierie. La sélection des matériaux composites a été faite en prenant comme critère de sélection le module d'élasticité de chacun des matériaux, car le module d'élasticité est le principal paramètre contrôlant la déformation au tuilage due au changement d'humidité (Blanchet 2008). Les résultats de cette recherche sont présentés dans le tableau 3.1.

Un deuxième axe de recherche avait pour but la réalisation des essais concernant la déformation au tuilage, lesquels ont été faits pour observer une première approche de la

performance envers la déformation au tuilage de certains matériaux composites. Quelques échantillons fournis par les entreprises de fabrication ou de distribution de matériaux composites ont été utilisés pour réaliser les essais de déformation au tuilage.

Tableau 3.1: Résultats de la recherche sur les sites web des matériaux composites comme substrat pour les lames de plancher d'ingénierie.

N	Nom	Caractéristique principale	Épaisseur (mm)
<i>Panneaux composites à base de bois</i>			
1	<i>Toro/Aphonos</i>	Isolant acoustique	12 - 15
2	<i>Sky ply CFC veneer core</i>	Résistance (contreplaqué)	6,35 – 12,7
3	<i>HEKIM YAPI</i>	Isolant thermique et acoustique	6 - 10
4	<i>Acousti-board</i>	Isolant thermique et acoustique	12,7
5	<i>REDUPAX</i>	Isolant thermique et acoustique	9
6	<i>Teragren bamboo architectural plywood panels</i>	Dureté, durabilité, stabilité	25,4 – 101,6
7	<i>Tectum ceiling panels</i>	Isolant acoustique	25,4 – 50,8
8	<i>Durisol</i>	Léger, très durable	
9	<i>HOTAFEX</i>	Isolant thermique et acoustique	8 - 20
<i>Panneaux composites (autres matériaux)</i>			
10	AYRLIRE 2022/2023	Léger, haute rigidité	10, 20, 30
11	AYRLIRE 2016	Léger, haute rigidité et résistance	10, 20, 30
12	<i>Aluminum plastic composite panel</i>	Léger, résistance à l'impact	2, 3, 4, 5, 6
13	<i>Durat</i>	Durabilité	12
14	<i>ChoiceDek</i>	Recyclé	25,4
15	Barymat M600-D	Isolant acoustique	14,2
16	Quiet Floor NPtm	Isolant acoustique	12,7
17	3K panneau de fibre de carbone	Très haute résistance	0,5 - 4
18	Panneau de fibre minérale	Isolant thermique et acoustique	12 - 20
19	Fibre de verre / mousse	Haute résistance	3,175 – 6,35
20	<i>Weave / Honeycomb</i>	Léger, haute résistance	3 - 12

Nous avons collé une couche de surface d'érable à sucre de 4 mm d'épaisseur sur la surface supérieure des matériaux composites. Les matériaux composites utilisés étaient des échantillons de 10 mm x 10 mm. Ces matériaux à structure sandwich étaient constitués de nid d'abeille de *Nomex*, de mousse de polyuréthane et de nid d'abeille d'aluminium comme cœur ou âme. Tandis que, des feuilles de fibre de verre ou de fibre de carbone et d'aluminium ont été utilisées comme surface. Enfin, tous les échantillons ont été isolés sur les côtés et en-dessous en utilisant un papier aluminium autocollant. Les essais au tuilage ont été faits selon la méthodologie proposée par Blanchet (2004). Les résultats ont

été comparés par rapport à la déformation au tuilage du panneau contreplaqué de bouleau baltique.

La figure 3.1 présente les courbes de déformation au tuilage des échantillons des matériaux composites. Le matériau composite nid d'abeille d'alliage d'aluminium de 10 mm d'épaisseur présente une meilleure performance envers la déformation au tuilage, tandis que le matériau composite nid d'abeille de *Nomex* avec une surface de fibre de verre présente une faible performance envers la déformation au tuilage.

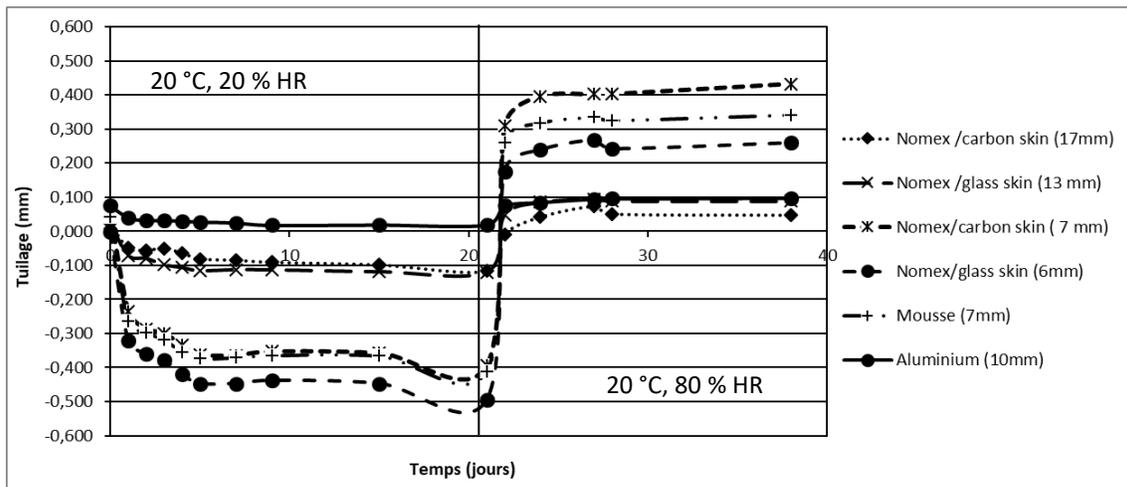


Figure 3.1: Courbes de déformation au tuilage des matériaux composites

Un autre axe de recherche de ce travail préliminaire a été le développement d'un panneau contreplaqué fabriqué à base des placages de bois de peuplier-faux-tremble renforcés avec des tissus de fibres naturelles ou des tissus de fibres synthétiques. Le panneau contreplaqué a été fait avec des placages de bois de 3 mm d'épaisseur pour les panneaux de trois plis et de 2 mm d'épaisseur pour les panneaux de cinq plis. Entre chaque pli a été mis un tissu de fibres naturelles (chanvre) ou un tissu de fibres synthétiques (fibre de verre, kevlar). Un adhésif époxy a été utilisé pour coller les plis. La figure 3.2 présente la configuration du panneau contreplaqué renforcé.

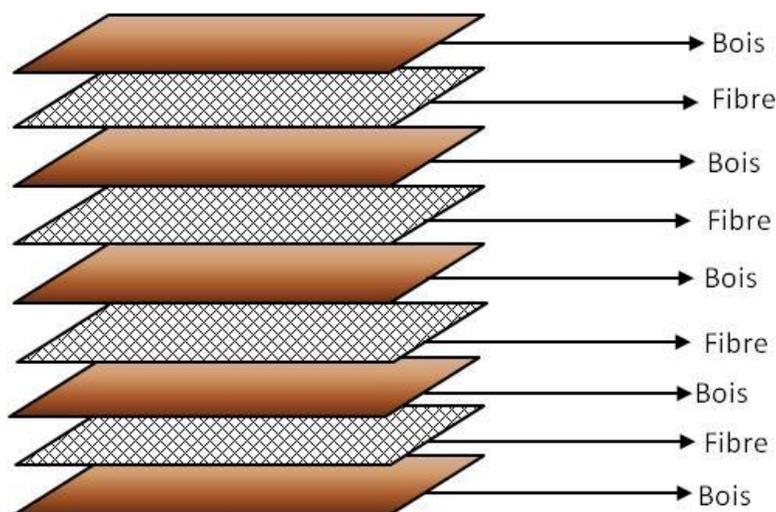


Figure 3.2: Configuration du panneau contreplaqué renforcé avec tissu de fibres naturelles ou synthétique

Les panneaux contreplaqués renforcés ont été faits dans le laboratoire. Les paramètres de pressage utilisés sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau 3.2: Paramètres de pressage du panneau contreplaqué de peuplier faux-tremble renforcé

Paramètres de pressage	Valeurs cibles
Température de pressage (°C)	22
Pression de pressage (KPa)	758
Temps de pressage (heure)	4
Quantité d'époxy (g/m ²)	236
Dimensions	30,48 x 30,48 cm

La figure 3.3 présente les résultats des essais de flexion des matériaux composites (trois plis) de peuplier faux-tremble renforcés avec les fibres naturelles et synthétiques. Les résultats ont été comparés par rapport aux panneaux sans renforcement faits avec l'époxy et le PUR. Le panneau contreplaqué renforcé avec la fibre de kevlar de 9 oz présente une augmentation de 10% en comparaison du panneau contreplaqué sans renforcement. Le

panneau contreplaqué renforcé avec le tissu de fibres de chanvre de 8 oz présente une diminution du module d'élasticité. En général, il n'y a pas de différence significative entre les panneaux contreplaqués renforcés et les panneaux contreplaqués sans renforcement.

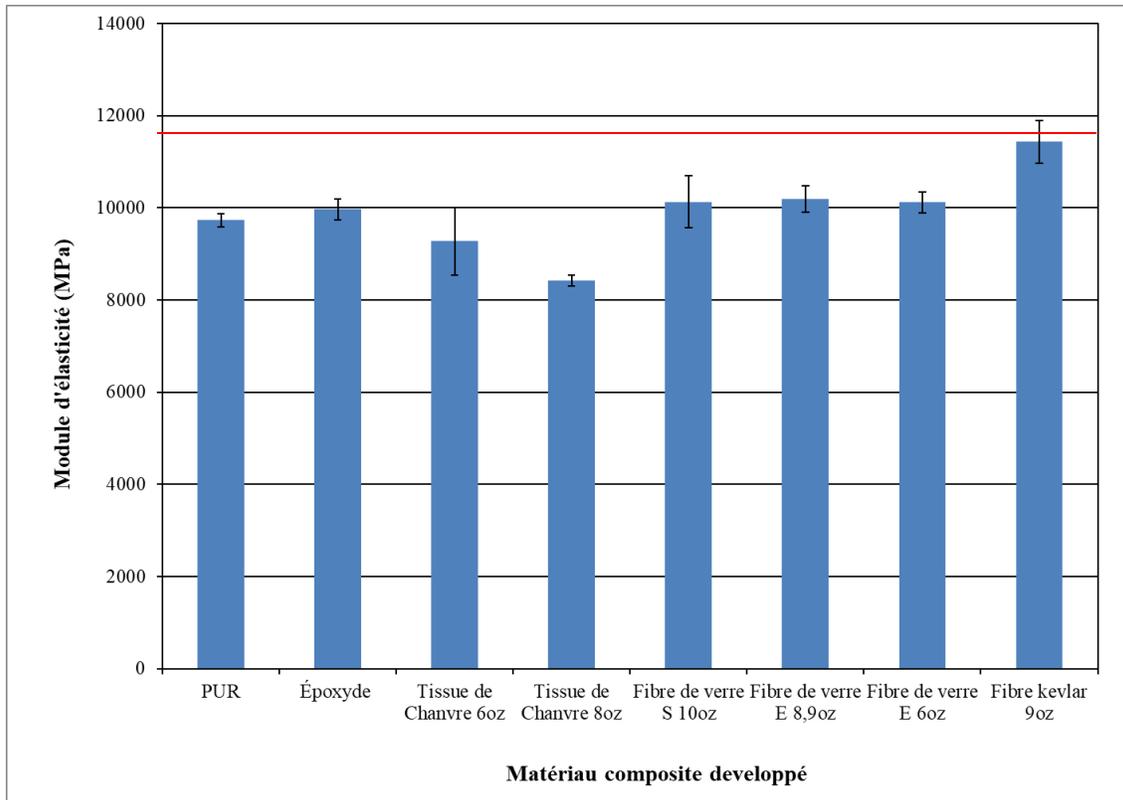


Figure 3.3: Module d'élasticité des matériaux composites (trois plis) de peuplier faux-tremble renforcés avec fibres naturelles et fibres synthétiques. — : Valeur moyenne du module d'élasticité du panneau contreplaqué de bouleau baltique, utilisé comme substrat de lames de plancher d'ingénierie.

Des résultats similaires ont été obtenus pour les panneaux contreplaqués de plis de 2 mm d'épaisseur et de cinq plis. La figure 3.4 présente la valeur du module d'élasticité obtenue pour les différents panneaux contreplaqués renforcés. On peut noter que le panneau contreplaqué renforcé avec fibre de verre E de 8.9 oz a présenté le module d'élasticité le plus élevé. Ce panneau a présenté une augmentation de 30% de la valeur du module d'élasticité en comparaison du panneau contreplaqué sans renforcement. Par contre, le panneau contreplaqué renforcé avec fibre de verre de 6 oz présente le module d'élasticité le plus faible. Il faut indiquer que même si les panneaux contreplaqués présentent une

augmentation du module d'élasticité, cette valeur est inférieure à la valeur du module d'élasticité du panneau contreplaqué de bouleau baltique, lequel est fréquemment utilisé dans la fabrication de lames de plancher d'ingénierie.

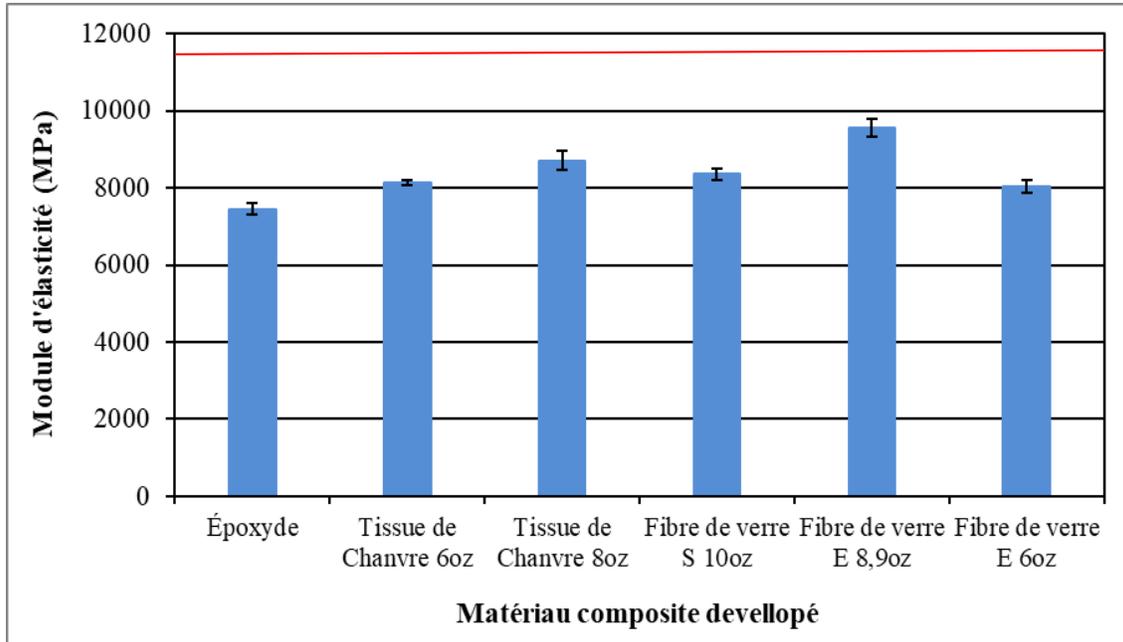


Figure 3.4: Module d'élasticité des matériaux composites (cinq plis) de peuplier faux-tremble renforcés avec fibres naturelles et fibres synthétiques. — : Valeur moyenne du module d'élasticité du panneau contreplaqué de bouleau baltique, utilisé comme substrat de lames de plancher d'ingénierie.

Nous avons réalisé aussi des essais préliminaires sur d'autres matériaux composites, lesquels ont été fabriqués avec un panneau aggloméré à base de bois (panneau contreplaqué, panneau de lamelles orientées, panneau de fibres de haute densité et panneau de fibres de moyenne densité) et deux tôles d'alliage d'aluminium de 0,6 mm (AL1) ou de 0,3 mm (AL2) d'épaisseur.

Les tôles d'alliage d'aluminium ont été collées avec de l'époxy sur les surfaces du panneau aggloméré à base de bois. Les paramètres de pressage utilisés pour les matériaux composites à structure sandwich ont été les mêmes que pour les panneaux contreplaqués de peuplier faux-tremble renforcé (tableau 3.2).

La figure 3.5 présente les résultats des essais de flexion des matériaux composites. Les résultats montrent l'augmentation de façon considérable du module d'élasticité dans le cas de tous les matériaux composites renforcés avec l'alliage d'aluminium. Dans le cas du panneau de fibres de haute densité, la valeur du module d'élasticité a augmenté cinq fois avec une surface d'aluminium de 0,6 mm d'épaisseur et 3,6 fois avec une surface d'aluminium de 0,3 mm d'épaisseur.

La valeur du module d'élasticité du panneau contreplaqué de peuplier faux-tremble de cinq plis collés à deux toiles d'alliage d'aluminium (PCL) a aussi considérablement augmenté. La valeur du module d'élasticité pour ce panneau a augmenté 2,6 fois avec une surface d'aluminium de 0,6 mm et 2,1 fois avec une surface d'aluminium de 0,3 mm d'épaisseur. Il faut indiquer que les résultats des valeurs du module de rupture des panneaux agglomérés commerciaux présentent la même tendance (figure 3.6).

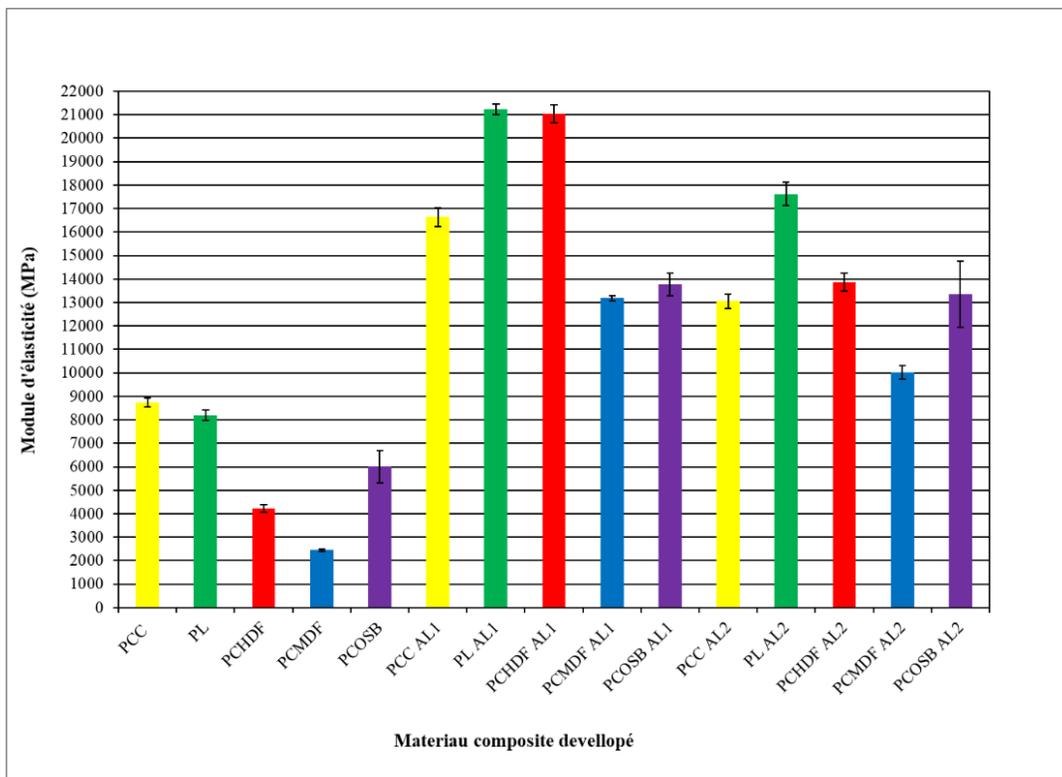


Figure 3.5: Résultats des essais en flexion à trois points : Module d'élasticité (MOE) des panneaux agglomérés à base du bois et matériaux composites à structure sandwich. PCC : Panneau contreplaqué commercial, PL : Panneau contreplaqué au laboratoire, PCHDF : Panneau commercial HDF, PCMDf : Panneau commercial MDF, PCOSB : Panneau commercial OSB, AL1 : Alliage d'aluminium de 0,6mm d'épaisseur, AL2 : Alliage d'aluminium de 0,3mm d'épaisseur.

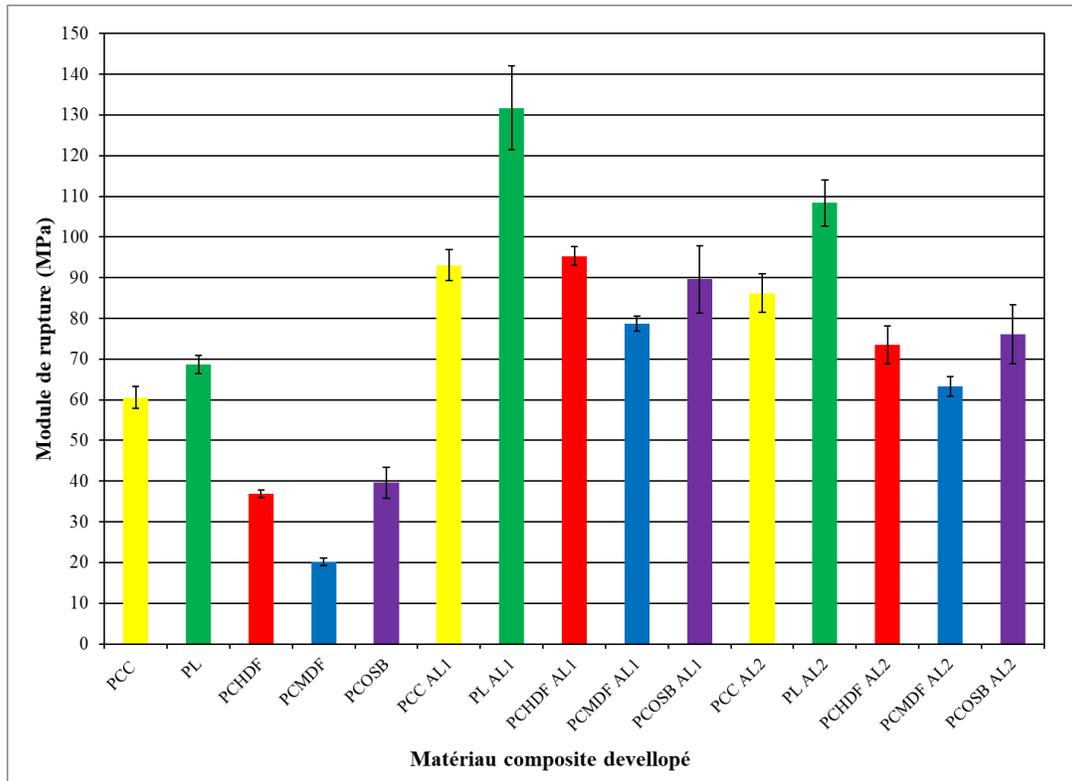


Figure 3.6: Résultats des essais en flexion à trois points : Module de rupture (MOR) des panneaux agglomérés à base du bois et matériaux composites à structure sandwich. PCC : Panneau contreplaqué commercial, PL : Panneau contreplaqué au laboratoire, PCHDF : Panneau commercial HDF, PCMDF : Panneau commercial MDF, PCOSB : Panneau commercial OSB, AL1 : Alliage d'aluminium de 0,6mm d'épaisseur, AL2 : Alliage d'aluminium de 0,3mm d'épaisseur.

3.1.1. Discussion des résultats des essais préliminaires

Les résultats des essais au tuilage présentent des valeurs importantes pour les matériaux composites. Le matériau composite nid d'abeille d'aluminium présente une résistance à la déformation au tuilage plutôt intéressante par rapport à une LPI faite avec un substrat de panneau contreplaqué de bouleau baltique (Barbuta et al. 2010). Ces résultats obtenus nous montrent qu'il serait intéressant de continuer à travailler avec le nid d'abeille d'aluminium comme substrat de LPI.

Les résultats des essais de flexion des panneaux contreplaqués renforcés en termes de MOE et de MOR ne présentent pas de différences significatives par rapport au

contreplaqué sans fibres de renforcement. Ces résultats montrent la même tendance que les essais faits par Bouffard et Amiotte (2011). Dans le cas du panneau contreplaqué renforcé avec Kevlar (9 oz), le MOE a augmenté de 10%, mais par rapport au MOE du panneau contreplaqué de bouleau baltique, celui-ci a présenté une valeur plus faible. La même tendance dans les résultats a été montrée pour le MOR.

Pour améliorer les propriétés mécaniques (MOR et MOE) des panneaux agglomérés à base de bois, nous avons choisi une configuration du matériau composite à structure sandwich. Nous avons commencé à faire des essais avec les panneaux agglomérés renforcés à la surface. Nous avons choisi le tissu de fibre de verre et des tôles d'alliage d'aluminium comme matériaux de renforcement. Les résultats obtenus pour les panneaux contreplaqués commercial de peuplier faux-tremble renforcés avec la fibre de verre présentent une augmentation de 9% par rapport aux panneaux sans renforcement. Cependant, les panneaux renforcés avec les tôles d'alliage d'aluminium présentent une augmentation de 100% par rapport aux panneaux sans renforcement.

Les résultats des panneaux renforcés avec la fibre de verre et époxy présentent une amélioration très faible par rapport aux tests réalisés par Biblis et Carino (2000). Ils ont trouvé une amélioration du MOE et du MOR de 22% et 34% dans la direction longitudinale. Par contre, les résultats se situent dans la gamme d'amélioration trouvée pour Cai (2006). Ce dernier a trouvé une amélioration du MOE et MOR de 18% et 12% pour des panneaux MDF renforcés avec de la fibre de verre et pour le MDI. De la même façon, il a amélioré de 16% pour le MOE et le MOR pour des panneaux LPO renforcés avec de la fibre de verre et pour le MDI. Néanmoins, les valeurs des MOE et MOR sont encore plus faibles que celles des panneaux contreplaqués du bouleau baltique.

Les résultats obtenus pour les matériaux composites à base de bois renforcés avec un alliage d'aluminium (3003) présentent des résultats assez intéressants pour notre recherche. Dans tous les matériaux composites renforcés, le MOE et le MOR ont montré des améliorations assez importantes. L'épaisseur de la tôle d'aluminium présente une relation directe avec l'augmentation du MOE et du MOR. Nous avons trouvé des propriétés mécaniques (MOR et MOE) très élevées par rapport aux panneaux

contreplaqués de bouleau baltique. Dans le cas du panneau HDF renforcé avec une tôle d'alliage d'aluminium de 0,6 mm d'épaisseur, le module d'élasticité est de 21000 MPa, soit très supérieur à la valeur du MOE du panneau contreplaqué du bouleau baltique.

Finalement, ce travail préliminaire a servi à clarifier la suite de notre travail de recherche en considérant les affirmations suivantes : la configuration des panneaux contreplaqués renforcés avec fibres naturelles et synthétiques entre les placages ou les plis ne présente pas d'augmentation significative pour les propriétés mécaniques. Pour tous les panneaux contreplaqués renforcés, leurs propriétés mécaniques (MOE et MOR) ont été inférieures par rapport au panneau contreplaqué de bouleau baltique. Les panneaux renforcés avec tôle d'alliage d'aluminium sur la surface présentent des propriétés mécaniques très élevées par rapport à celles des panneaux contreplaqués de bouleau baltique, principalement les panneaux agglomérés à base de bois laminés avec l'alliage d'aluminium de 0,6 mm d'épaisseur. Le panneau nid d'abeille d'aluminium présente une grande résistance à la déformation au tuilage par rapport aux autres panneaux en raison de sa résistance à l'humidité. Un autre défi a été d'avoir un collage assez résistant pour les différents essais entre la tôle d'aluminium et le panneau aggloméré à base de bois. Finalement après plusieurs essais, le polyuréthane est choisi pour continuer notre travail de recherche.

3.2. Caractérisation des matériaux composites à structure sandwich

La première partie de la recherche a été consacrée à déterminer les propriétés physiques et mécaniques des matériaux composites développées. D'abord les essais préliminaires réalisés ont permis d'écarter les différentes configurations de matériaux composites et de sélectionner une structure sandwich comme la plus appropriée pour la suite de la recherche. Les propriétés des matériaux composites dépendent principalement de leur configuration et des matériaux utilisés pour leur fabrication. La figure 3.7 représente la configuration du matériau composite, lequel est composé d'un panneau aggloméré à base de bois comme noyau et d'une tôle d'alliage d'aluminium comme peau. Les deux revêtements du matériau composite, d'épaisseur t_p , sont responsables pour supporter les forces en tension et en compression. Le noyau, d'épaisseur h_c est un panneau aggloméré

à base du bois qui peut supporter les tensions en cisaillement, et s'occupe de séparer les revêtements ou les peaux en augmentant les valeurs de moment d'inertie de la section.

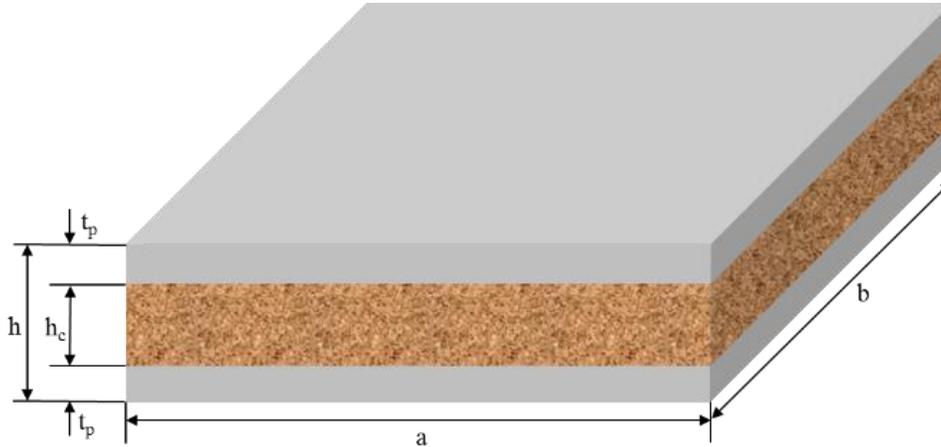


Figure 3.7: Configuration du panneau composite à fabriquer

3.2.1. Matériaux pour la fabrication des matériaux composites à structure sandwich

Quatre types de panneaux agglomérés à base de bois ont été sélectionnés comme noyau pour la fabrication des matériaux composites : panneau de fibres à haute densité, panneau de fibres à moyenne densité, panneau de lamelles orientées, et panneau contreplaqué de peuplier faux-tremble. Les trois premiers panneaux ont été fournis par l'industrie canadienne des panneaux, tandis que le panneau contreplaqué a été fabriqué dans le laboratoire. Comme peaux des matériaux composites, une tôle d'alliage d'aluminium 3003 de 0,6 mm d'épaisseur a été sélectionnée par rapport aux essais préalables réalisés dans le laboratoire. Le polyuréthane (*Macroplast UR-8340 Series*) a aussi été sélectionné comme adhésif pour coller la tôle d'alliage d'aluminium et le panneau aggloméré à base de bois.

3.2.2. Processus de fabrication des matériaux composites à structure sandwich

La figure 3.8 représente le diagramme du matériau composite qui a été fabriqué en laboratoire. Pour la fabrication des matériaux composites à structure sandwich, les panneaux agglomérés à base de bois ont été dimensionnés en 24po x 24po, puis ils ont été conditionnés à 20°C de température et 42% d'humidité relative jusqu'à avoir une masse constante (8% de teneur en humidité). La tôle d'alliage d'aluminium a été sablée avec un papier abrasif N° 150 pour donner plus de surface de contact. La tôle a ensuite été nettoyée et dégraissée avec de l'acétone, tandis que les panneaux agglomérés ont été sablés avec un papier abrasif N° 120 et nettoyés. L'adhésif polyuréthane a été appliqué en utilisant un rouleau sur la surface du panneau aggloméré et aussi sur la surface de la tôle d'alliage d'aluminium.

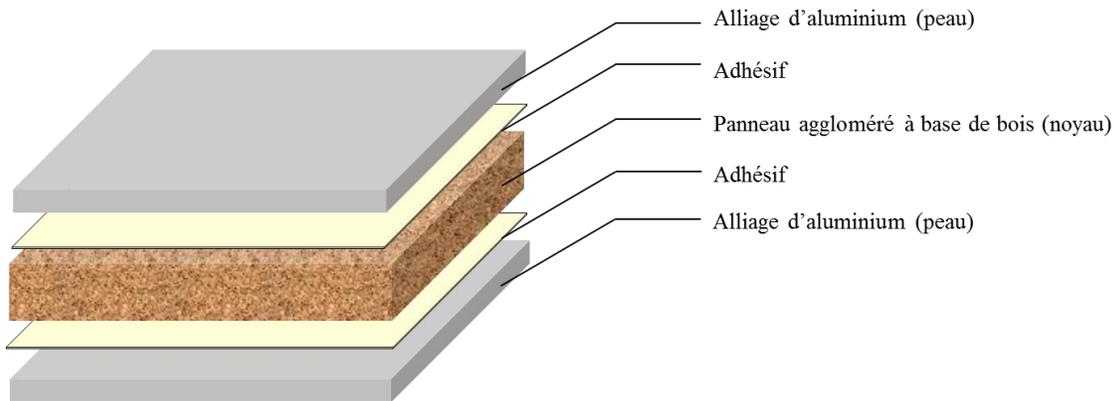


Figure 3.8: Composant du matériau composite à structure sandwich

Les matériaux composites ont été assemblés et pressés dans une presse à plateau chaud (Dieffenbacher). Le tableau 3.3 détaille les paramètres de pressage utilisés au laboratoire.

Tableau 3.3: Paramètres de pressage des matériaux composites

Paramètres de pressage	Valeurs cibles
Température de pressage (°C)	120
Pression de Pressage (kPa)	689
Temps de Pressage (min)	6
Quantité de Polyuréthane (g/m ²)	130

Afin de réaliser les différents essais, les matériaux composites fabriqués ont été placés dans la chambre de conditionnement à 20°C de température et 65% d'humidité relative, jusqu'à avoir une masse constante. Le but a été d'uniformiser la teneur en humidité d'équilibre à 12%.

3.2.3. Essais physico-mécaniques des panneaux agglomérés à base de bois.

Les propriétés physiques et mécaniques des panneaux agglomérés à base de bois ont été déterminées afin de les comparer avec celles des matériaux composites à structure sandwich. La masse volumique des panneaux agglomérés à base de bois a été calculée selon la norme ASTM 2395-07a *Standard Test Methods for Evaluating Properties of Wood-Base Fiber and Particle Panel Materials* (ASTM 2013). La teneur en humidité a été mesurée en accord avec la norme ASTM D4442 Méthode B. *Standard test methods for direct moisture content measurement of wood and wood-based materials* (ASTM 2013). Le gonflement en épaisseur, l'absorption d'eau et la dilatation linéaire ont été déterminés en accord avec la norme ASTM D1037.06a. Les propriétés mécaniques comme la cohésion interne en tension perpendiculaire à la surface, le module d'élasticité (MOE) et le module de rupture (MOR) en flexion statique à trois points et le cisaillement dans le plan du panneau ont été aussi déterminés selon la norme ASTM D1037.06a. *Standard Test Methods for Evaluating Properties of Wood-Base Fiber and Particle Panel Materials* (ASTM 2012).

3.2.4. Essais physico-mécaniques des matériaux composites à structure sandwich

La masse volumique des matériaux composites à structure sandwich a été calculée en utilisant l'équation suivante :

$$p^* = \left(\frac{2h_f}{h}\right) * p_f + \left(\frac{h_c}{h}\right) * p_c \quad (9)$$

Où p^* est la masse volumique à déterminer, p_f est la masse volumique de l'alliage d'aluminium, p_c est la masse volumique du panneau aggloméré à base de bois, h est l'épaisseur total du matériau composite ($h=2h_f+h_c$), h_f est l'épaisseur de l'alliage d'aluminium et h_c est l'épaisseur du panneau aggloméré à base de bois (Carlsson and Kardomateas, 2011).

Le gonflement en épaisseur, l'absorption d'eau et la dilatation linéaire des matériaux composites ont aussi été déterminés en accord avec la norme ASTM D1037.06a (ASTM 2012). Les propriétés mécaniques des matériaux composites comme la cohésion interne en tension perpendiculaire à la surface, le MOE et le MOR en flexion statique à trois points et le cisaillement dans le plan du panneau ont aussi été déterminées selon la norme ASTM D1037.06a. *Standard Test Methods for Evaluating Properties of Wood-Base Fiber and Particle Panel Materials* (ASTM 2012). Enfin, la résistance à la tension perpendiculaire à la surface des matériaux composites a été calculée en accord avec la norme européenne EN 311 :2002. *Wood-based panels-surface soundness-test method,* European Committee for Standardization, *European Standard* (European Standard 2002).

3.2.5. Le dispositif expérimental

Le dispositif expérimental utilisé pour l'analyse statistique des résultats des essais mécaniques est en fonction du type de panneaux et de l'épaisseur de surface. Ce dispositif factoriel est réalisé afin de pouvoir appliquer une analyse de variance ANOVA, laquelle est analysée à l'aide du logiciel Statistical Analysis System (SAS). Pour les propriétés

physico-mécaniques mesurées, on considère 10 répétitions. Le plan d'expérience factorielle considéré se fait à quatre niveaux de panneau aggloméré (contreplaqué, de fibres de haute densité, de fibres de moyenne densité et de lamelles orientées) et à deux niveaux de surface (alliage d'aluminium de 0,6 mm d'épaisseur et sans alliage d'aluminium).

3.3. Détermination de la performance environnementale des matériaux composites à structure sandwich.

Cette partie vise à détailler la méthodologie utilisée pour déterminer les impacts environnementaux de la fabrication des matériaux composites à structure sandwich. Une fois les matériaux composites ont été caractérisés techniquement. Le travail s'est poursuivi avec la détermination des impacts environnementaux potentiels des matériaux composites à structure sandwich, pour lesquels une étude d'analyse du cycle de vie comparative a été réalisée selon la méthodologie internationalement reconnue et encadrée par les séries de normes ISO 14040 (2006) – Management environnemental - Analyse du cycle de vie - Principe et cadre et ISO 14044 (2006) – Management environnemental - Analyse du cycle de vie – Exigences et lignes directrices. La modélisation du cycle de vie des matériaux composites développés a été faite du tout début à la porte de l'usine. Les phases d'utilisation et de fin de vie n'ont pas été considérées. Le logiciel SimaPro 8.4 développé par *Pré Consultant* est utilisé pour la modélisation. Ce logiciel est communément utilisé pour ce type d'étude au niveau global. La modélisation des matériaux composites a été réalisée en utilisant les données calculées dans le laboratoire et adaptées au niveau industriel. Les données de l'inventaire d'émission et d'extraction ont été utilisées dans la base de données *Ecoinvent*. Pour l'agrégation des résultats de l'inventaire d'émission et d'extraction, il existe plusieurs méthodes d'analyse d'impact intermédiaire (impact direct) ou de dommage. Dans notre cas, nous avons choisi d'utiliser deux méthodes : IMPACT 2002+ et TRACI (*Tool for reduction and assessment of chemicals and other environmental impacts*). Les résultats obtenus pour chaque alternative des matériaux composites à structure sandwich sont présentés dans le chapitre 5. Les conclusions relatives aux alternatives sur la performance environnementale ont été

utilisées pour la détermination des applications potentielles des matériaux composites à structure sandwich.

3.4. Détermination des applications potentielles des matériaux composites à structure sandwich

Cette partie de la méthodologie a comme but de :

- Déterminer les avantages et/ou désavantages des quatre types de matériau composite à structure sandwich développés.
- Déterminer les applications potentielles des quatre types de matériau composite à structure sandwich développés.

La caractérisation économique indique que le prix estimé de matériau à structure sandwich est trop élevé pour être utilisé comme substrat pour les lames de planche d'ingénierie, par conséquent d'autres applications sont à considérer. À cette fin, nous avons jugé convenable l'utilisation d'une méthodologie de nature qualitative. Nous avons considéré l'utilisation de la méthodologie de recherche qualitative basée sur la théorie ancrée de Glaser and Strauss (1967). La méthodologie permet une interprétation, une appréciation et une analyse des informations non numériques qui vont aider à déterminer des applications potentielles des matériaux composites à structure sandwich développés. Ce type de recherche est particulièrement approprié lorsque les facteurs observés sont subjectifs et difficiles à mesurer comme dans notre cas. La théorie ancrée comprend une méthodologie qui tente de développer une théorie ou proposition basée en la collecte et l'analyse systématique de données empiriques (Hernández 2014).

3.4.1. Population à l'étude et échantillon

La population ou le public cible pour notre étude se compose de producteurs de produits structuraux et non structuraux pour le bâtiment et le transport ainsi que les concepteurs de produits installés dans la province de Québec.

3.4.2. Échantillonnage théorique

L'échantillonnage dans le cadre de l'étude a été réalisé selon la méthode non probabiliste. En conséquence, il ne prétend pas être statistiquement représentatif. La méthode non probabiliste appelle aussi la méthode empirique à être sélectionnée. Selon la nature de l'étude, il n'est pas possible que tous les individus de la population aient une probabilité non nulle d'être sélectionnés. Les techniques d'échantillonnage non probabilistes permettent la sélection des individus pour l'échantillon à la base de l'intérêt connus comme critères d'inclusion. Les sujets (participants) ont été sélectionnés en appliquant certaines caractéristiques précises qui les distinguent. Les participants dans l'étude ont été seulement des volontaires (échantillonnage de volontaires). La sélection des participants ou unités d'échantillon a été faite en utilisant la technique de commodité.

3.4.3. Critères d'inclusion des participants

Les critères que nous avons utilisés pour l'inclusion des participants à l'étude sont :

- Avoir une connaissance des matériaux composites (matériau composite à base de bois ou matériau composite à structure sandwich).
- Travailler dans le secteur de la construction de bâtiment ou transport ou travailler dans le secteur de développement de produits.
- Avoir une certaine influence sur le développement de produits.
- Demeurer dans la province de Québec.

Les critères d'inclusion ont été sélectionnés pour avoir des informations intéressantes et pertinentes à propos des objectifs de la recherche. Ceux-ci peuvent assurer d'avoir une information claire et plus précise en accord avec les objectifs de la recherche.

3.4.4. Recrutements des participants

D'abord, les premiers participants ont été recrutés à l'aide d'un appel téléphonique (voir annexe A-1) ou à l'aide d'un courrier électronique (voir annexe A-1). Les objectifs de notre recherche, le caractère volontaire de leur participation, ainsi que quelques détails sur les entrevues ont été détaillés dans les deux cas de recrutement. Quelques autres

participants ont été recrutés à l'aide de la technique boule de neige, c'est-à-dire référés par les premiers interviewés. Après, nous avons suivi le même procédé de recrutement que pour les premiers participants.

Le lieu, la date et l'heure de l'entrevue ont été établis pour la personne à interviewer. La plupart des entrevues se sont déroulées dans le centre de travail ou bureau des interviewés. Quelques autres ont été effectuées à l'Université Laval. Les entrevues ont été réalisées en français. La taille de l'échantillon a été définie sur la base du critère de saturation de la théorie ancrée.

3.4.5. Le mode de collecte des données

Selon le type d'étude, la technique d'entrevue semi-structurée individuelle à question ouverte a été choisie pour réaliser les objectifs de la recherche qualitative, en considérant la nature et l'orientation méthodologique de l'étude. La réalisation de l'entretien semi-structuré implique la prise en compte d'un certain nombre d'éléments comme les buts de l'étude, le cadre conceptuel, les questions de recherche, la sélection du matériel empirique, les procédures méthodologiques, les ressources temporelles personnelles et matérielles disponibles. Les entrevues semi-structurées ont permis d'approfondir notre connaissance sur le développement des matériaux composites principalement des matériaux composites à base de bois laminé avec alliage d'aluminium (structure sandwich).

3.4.6. L'instrument de collecte des données

Nous avons utilisé un guide d'entrevue (voir annexe A-2) pour la collecte des données. Les questions posées dans le guide ont été des questions ouvertes pour la nature de notre recherche. Les questions ont été regroupées en deux parties. La première partie des questions a été consacrée à connaître les renseignements généraux des participants pertinents pour notre étude comme la formation professionnelle et l'expérience de travail. Dans cette partie, nous avons aussi posé des questions pour connaître les produits des entreprises ainsi que le degré d'implication ou l'influence des participants dans le processus de développement de produits.

Avant de passer à la deuxième partie de l'entrevue, nous avons présenté aux participants des échantillons du matériau composite à structure sandwich développé et une feuille expliquant les propriétés physiques et mécaniques des matériaux composites. Nous avons donné le temps nécessaire pour expliquer et clarifier les résultats obtenus des propriétés physiques et mécaniques présentées sur la feuille.

La deuxième partie des questions a été consacrée à connaître des informations et les opinions sur : les avantages ou les désavantages pour les matériaux composites à structure sandwich, les caractéristiques considérées dans le développement d'un matériau composite, les applications potentielles plus réalistes pour chacun des matériaux composites à structure sandwich présentés ainsi que l'intégration des matériaux composites à la production des entreprises. Les questions dans cette partie des entrevues ont aussi inclus les aspects économiques et environnementaux des matériaux composites à structure sandwich.

L'instrument de collecte des données (guide d'entrevue) a été soumis à un prétest afin de vérifier la pertinence des questions ainsi que la justesse et la précision des questions. Ce prétest nous a permis de réduire et d'adapter les questions du guide ainsi que de faire une entrevue plus ordonnée et fluide.

3.4.7. Analyse des données

L'analyse des données recueillies a été faite en utilisant la méthodologie de la théorie ancrée. D'abord, le contenu de chaque entrevue a été transcrit en format Word. Une lecture préliminaire a été réalisée de chaque matériel recueilli auprès des interviewés. En utilisant le logiciel *Nvivo 11* de *QRS international Pty. Ltd. Doncaster, Australia*, nous avons réalisé le codage *a posteriori* (catégorisation et classification du contenu des interviewés). Cette phase comprend la réorganisation du matériel qui le regroupe en catégories ou en sous-catégories. Enfin, une dernière phase a consisté en l'interprétation des résultats.

Considérations éthiques : Avant de commencer l'entrevue, nous avons présenté le formulaire de consentement aux participants (voir Annexe A-3). Nous avons donné le temps pertinent à chacun des participants pour lire correctement le formulaire et le signer.

Nous avons aussi communiqué à l'avance la finalité et les conséquences de la recherche aux participants.

Comme préparation à l'entrevue, nous avons présenté verbalement le projet de recherche et donné des informations sur le sujet de l'étude. Nous avons aussi informé le droit de refuser de répondre à l'une ou l'autre des questions posées dans le cadre de l'entrevue. Nous avons aussi demandé le consentement à tous les participants pour réaliser l'enregistrement de l'entrevue en utilisant un magnétophone.

Finalement, les enregistrements seront conservés pendant deux ans et détruits par la suite à l'hiver 2018. Les données reliées à chacun des participants seront accessibles seulement au chercheur. Ce projet de recherche a reçu l'approbation du comité sectoriel plurifacultaire d'éthique de la recherche de l'Université Laval (**CERUL 2015-045/10-04-2015**).

Rapport-Gratuit.Com

Chapitre 4 Aluminum-laminated Panels: Physical and Mechanical Properties

4.1. Résumé

Le laminage avec un alliage d'aluminium a été réalisé pour améliorer les propriétés physiques et mécaniques de certains matériaux composites à base de bois. Les matériaux composites ont été laminés avec deux plaques d'alliage d'aluminium à 689 kPa de pression et 120 °C de température pendant six minutes. Quatre types différents de matériaux composites à base de bois ont été utilisés comme noyau ou âme, alors qu'un alliage d'aluminium 3003 a été utilisé comme peau ou revêtement. Un adhésif de polyuréthane a été utilisé pour le collage du matériau composite avec l'alliage d'aluminium. L'objectif de l'étude est d'évaluer les propriétés physiques et mécaniques des matériaux composites laminés. Les résultats démontrent que les matériaux composites laminés jouissent d'une meilleure stabilité dimensionnelle (gonflement en épaisseur et expansion linéaire). Les propriétés mécaniques en flexion, comme le module d'élasticité apparent (E_{app}) et le module de rupture (MOR), ont été significativement augmentées avec le laminage d'alliage d'aluminium. Le panneau de fibres de densité moyenne (MDF) a montré une augmentation de 554% pour E_{app} et de 570% pour MOR par rapport au panneau MDF non laminé. La résistance au cisaillement de panneaux de lamelles orientées et contreplaqué a augmenté de 44% et 77% respectivement. Les résultats ont confirmé que les matériaux composites laminés avec alliage d'aluminium peuvent être utilisés comme matériaux de structure dans les applications futures.

4.2. Abstract

Aluminum lamination was performed to improve the physical and mechanical properties of several wood-based composite panels. The panels were aluminum-laminated on two faces in a hot press at 689 kPa and 120 °C for 6 min. Four types of wood-based composites were used as cores, and aluminum 3003 alloy sheets were used for face laminations. Polyurethane adhesive ensured bonding strength between the wood-based composite and the aluminum sheets. The objective was to assess sandwich composite panels made of wood-based composites as a core layer with aluminum-laminated faces. This study evaluated the physical and mechanical properties of these panels. The results show that aluminum-laminated panels had higher dimensional stability (thickness swelling and linear expansion values). Bending properties such as the apparent modulus of elasticity (E_{app}) and the modulus of rupture (MOR) were significantly increased with face-lamination. Medium-density fiberboard (MDF) laminate presented an increase of 554% for E_{app} and 570% for MOR in comparison with non-laminated MDF panels. The shear edgewise strength for oriented strand board and plywood increased by 44% and 77%, respectively. The results confirm that aluminum-laminated panels have the potential to be used as structural panels in future applications.

4.3. Introduction

Wood-based composites are used in a number of structural and non-structural applications. Performance criteria are directly related to the end use of these composites. Knowledge of their physical and mechanical properties is of critical importance to their future applications (Cai and Ross 2010). Traditional wood-based composites offer desirable properties for their main applications—oriented strand board (OSB) and plywood are used as structural material for construction, whereas particleboard and medium-density fiberboard (MDF) with laminating paper are used in cabinetry, furniture, and mouldings (Maloney 1993). Certain weaknesses, such as their mechanical properties, poor water resistance, dimensional stability, and durability, limit their use in applications involving exposure to wet environmental conditions. In the last decades, several studies attempted to improve the performance and structural efficiency of wood-based composites (Xu *et al.* 1998a; Biblis and Canino 2000; Cai 2006; Bouffard and Amiotte 2011). Reinforcement has been beneficial for improving physical and mechanical properties, decreasing variations, and improving durability. Reinforcement with materials of high strength and stiffness, such as fiberglass, carbon fiber, kevlar, natural fibers, and metal, has been used to increase the flexural and shear properties of wood-based composites. These reinforcements have been placed between the veneers or on the faces of plywood, OSB, high-density fiberboard (HDF), and MDF. Xu *et al.* (1998b) used bamboo fiber and jute fiber as reinforcements to make fiber-reinforced plywood with increased mechanical properties. Other research using various types of reinforcement between veneers or fiber layers presented a similar increase in mechanical properties (Xu *et al.* 1998a; Borysiuk *et al.* 2007; Abdul Khalil *et al.* 2010; Mohebbi and Tavassoli 2011; Kishi and Fujita 2008; Cerbu *et al.* 2010).

Laminated panels, also called sandwich panels, have a wide range of utilization. They have been widely used in aircraft, automotive, marine, and other structural applications for a long time. Laminated panels are a special group of laminates that most frequently consist of three laminae, of which the core is much thicker and lower in stiffness and rigidity than the faces (Bodig and Jayne 1993). Recent applications have demonstrated that laminated panels can be effectively and economically used in engineering

infrastructure (Manalo *et al.* 2010). Laminated panels offer high bending stiffness and high strength-to-weight ratios, which are achieved when the face and core interact in an optimal way (Belouettar *et al.* 2009). Several types of face and core material have been used in the design of laminated panels. Frequently used face materials include aluminum alloys, steel, fiberglass, hardboard, and gypsum, while frequent core materials include polyurethane, polyisocyanurate, expanded polystyrene, extruded polystyrene, mineral wool, and balsa wood (Pokharel and Mahendran 2003). In a laminated panel, the top and bottom layers (face materials) carry bending moments as tensile or compressive stresses, while the core materials transfer the transverse forces as shear stresses and support the faces against buckling and wrinkling (Shipsha 2013). Laminated panels may offer other properties such as good durability, lightness, and high acoustic and/or thermal insulation.

Among the development of wood-based laminated panels with enhanced properties, Biblis and Carino (2000) evaluated the mechanical properties of 3-ply and 5-ply southern pine plywood laminated with fibreglass-reinforced plastic. The results showed considerable improvement in the stiffness and strength of plywood panels with face-lamination on both sides with layers of thin fibreglass-reinforced plastic. Similarly, Cai (2006) evaluated the mechanical and physical performance of MDF and flakeboard laminated with fibreglass. Fibreglass lamination improved the apparent modulus of elasticity (E_{app}) and modulus of rupture (MOR), as well as resistance to water absorption (WA) and thickness swelling (TS). Biblis *et al.* (1996) compared the flexural properties of wood veneer-overlaid OSB composite panels from southern pine. The E_{app} and MOR values in the parallel direction to the wood veneer grain were increased by 96% and 117% in comparison with those of OSB panels without wood veneer lamination. Results from other studies demonstrated that the mechanical properties of wood-based composites can be considerably improved if these are laminated with reinforced materials (Kawasaki *et al.* 1999; Ayilimis *et al.* 2008; De Figueiredo *et al.* 2009; Büyüksari *et al.* 2012). Another mechanical property studied in wood-based composites and laminated panels is shear strength. Manalo *et al.* (2013) investigated the shear behaviour of a laminated panel comprised of glass fiber-reinforced polymer skins and modified phenolic core material. The results showed significant improvement of the shear strength of the laminated panels in the edgewise direction. The bonding strength of the face materials is important since the lamination

materials are influenced by negative conditions such as high humidity, high temperature, and tensile and compression stresses (Kilic *et al.* 2009). The quality of adhesion depends on the anisotropic and heterogeneous character of wood or other materials, as well as the nature of adhesive.

The adhesive must assure the transfer of the effort and compensate the differences of thermal expansion, moisture expansion, and elongation under constraints of different materials. Among the adhesives used, epoxy, polyester, and polyurethane stand out. The bonding strength in the laminated panels between material core and face-sheets has been extensively studied by Kilic *et al.* (2009). Li and Weitsman (2004) and Siriruk *et al.* (2008) used a laminated panel debonding fracture test to investigate toughness at the core/facing interfaces.

4.4. Objective

The objective of this study was to assess the performance of wood-based composites as a core layer of aluminum-laminated panels. This study evaluated physical properties, such as density, thickness swelling, water absorption, and linear expansion, as well as mechanical properties including bending properties, internal bond strength, edgewise shear, and tensile strength of the surface of wood-based composites with and without lamination of aluminum alloy sheets. The determination of physical and mechanical properties are critical to identify potential applications for the aluminum-laminated panels. Finally, this study determined an estimate of the manufacturing cost of aluminum-laminated panels. This estimate was determined considering all resources consumed in the manufacturing process, as well as variable costs and fixed costs.

4.5. Experimental

4.5.1. Materials

Four types of wood-based composite panels were used as cores: HDF, MDF, OSB, and aspen plywood (Table 4.1). These panels were obtained on the market as produced by the manufacturers, except the aspen plywood, which was manufactured in a laboratory with five 2-mm plies of aspen (*Populus tremuloides* Michx). Phenol-resorcinol-formaldehyde

was used as an adhesive at a 260 g/m² spread rate. The plywood was manufactured under a pressure of 689 kPa at room temperature for 7 hours.

Table 4.1: Physical properties of wood-based composites

Wood-based Composites	Symbol	Moisture Content (%)¹	Thickness (mm)	Density (kg/m³)¹
High-density fiberboard	HDF	6	9.74	817 ²
Medium-density fiberboard	MDF	7	9.99	798 ²
Oriented strand board	OSB	8	10.57	673
Aspen Plywood	PW	10	9.17	542

¹Moisture content was determined using ASTM Standard D4442-07 (Method A-Oven-Drying), while the density of wood-based composites was determined according to ASTM Standard D2395-07 (Test Method A- volume by measurement).

²The acronyms HDF and MDF were used commercially by the fiberboard market.

The wood-based composites were trimmed to dimensions of 600 mm by 600 mm and conditioned at 20 °C and 50% RH until constant mass was achieved. These conditions reached an equilibrium moisture content (EMC) of between 6% and 10%, depending on their nature (Table 4.1). The laminating material consisted of aluminum alloy sheets 3003 with a thickness of 0.6 mm and a nominal density of 2740 kg/m³. This aluminum alloy sheet was selected because of its water barrier properties, mechanical properties, and low cost, while the selection of the thickness was based on preliminary work. A liquid polyurethane adhesive (Macroplast UR-8346) provided by Henkel Canada Corporation was used to bond the aluminum to the core materials. The adhesive was selected after preliminary work, in which epoxy and polyurethane were considered. The aluminum honeycomb panel (EC-PI 626AS), provided by SCEI (Aéronautique Défense Spatial), was used for the purpose of comparison.

4.5.2. Methods

Panel lamination: To examine the effect of lamination with aluminum on wood-based composite performance, four panels out of seven were laminated for each type of wood-based composite. The three remaining panels were kept as control panels for comparison purposes. The wood-based composites were laminated on both faces with 0.6-mm-thick aluminum alloy sheets (Fig. 4.1).

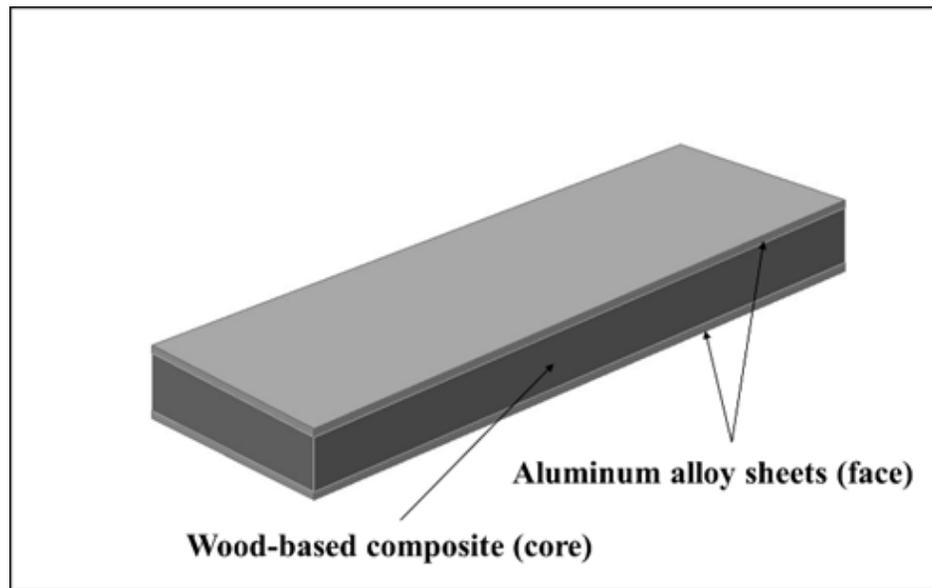


Figure 4.1: Schematic illustration of aluminum-laminated panel

The polyurethane adhesive was applied at a spread rate of 130 g/m^2 , according to manufacturer instructions. The aluminum alloy sheets were sanded with 150-grit sandpaper and cleaned with acetone. This pretreatment is common in the bonding of aluminum sheets. OSB and plywood panels were sanded with 120-grit sandpaper. The laminated panels with two aluminum alloy faces were pressed in the laboratory hot press at 689 kPa and $120 \text{ }^\circ\text{C}$ for six minutes using a Dieffenbacher press (Germany). After pressing, the laminated panels were stored in a conditioning chamber at $20 \text{ }^\circ\text{C}$ and 65% RH until a constant mass was reached.

Determination of physical and mechanical properties: Four laminated panels were used to prepare the test specimens by each types of wood-based composites. A total of ten 50 x 50 mm laminated specimens were prepared for each type of laminated panel for testing density and moisture content. A total of eight specimens of 150 x 150 mm were prepared for the TS and WA tests. Eight specimens of 76 x 300 mm were prepared for the linear expansion (LE) tests. Twelve laminated specimens were prepared for the mechanical tests. Non-laminated wood-based composite specimens were tested using the same procedures for comparison purposes.

The density (ρ^*) of each laminated panel was calculated using Eq. 4.1,

$$\rho^* = (2h_f/h) \cdot \rho_f + (h_c/h) \cdot \rho_c \quad (4.1)$$

where “ ρ_f ” and “ ρ_c ” are the densities of the aluminum alloy sheets and wood-based composites, h is the total thickness of the laminated panel ($h = 2h_f + h_c$), “ h_f ” is the thickness of the aluminum alloy sheets, and h_c is the thickness of the wood-based composites (Carlsson and Kardomateas 2011).

Physical properties such as TS, WA, and LE were determined according to ASTM Standard D1037.06a (ASTM 2012). TS and WA were determined after 2-h and 24-h water immersions at room temperature (Method A-ASTM D 1037.06a).

The bending strength, internal bond strength (IB), and edgewise shear tests were conducted using ASTM Standard D1037.06a (ASTM 2012). A three-point static bending test was carried out. The rates of motion of the moving head were 5.19, 5.23, 5.51, and 4.87 mm/min, while lengths of span were 259.68, 261.36, 275.28, and 243.60 mm for R-HDF, R-MDF, R-OSB and R-PW respectively (according to ASTM Standard D1037.06a). The mechanical properties as E_{app} and MOR were determined parallel to the face of grain for laminated OSB- and plywood-core panels. The E_{app} is defined in this article as the modulus of elasticity without considering the shear deformation (Bodig and Jayne 1993). The E_{app} and MOR values of aluminum-laminated panels were compared

with aluminum honeycomb panel. The EC-PI 626AS panels were 10 ± 0.3 mm in thickness with a face sheet of 0.6-mm thickness. Edgewise shear tests (shear normal to the plane of the panel) were carried out in axial compression on laminated specimens of 89 x 254 mm clamped between two pairs of steel loading rails according to ASTM Standard D1037.06a (ASTM International 2012).

The surface soundness of the laminated panels testing was conducted according to EN 311:2002 standard (European Standard 2002). A total of eight laminated specimens of 50 x 50 mm were prepared for each type of laminated panel for testing surface soundness. The variability between laminated panels with same cores was not considered. A circular groove 35.7 ± 0.2 mm in diameter was cut into the surface of the aluminum alloy sheets. The circular groove did not penetrate more than 0.3 ± 0.1 mm into the core layer of the wood-based composite. A steel pad was bonded with epoxy to the area within the circular groove. The laminated specimens were installed in a test machine, and tensile force was applied at a constant speed so that failure occurred between 30 to 90 seconds after the beginning of loading. The surface soundness was calculated using Eq. 4.2,

$$SS = F/A, \quad (4.2)$$

Where SS is surface soundness in megapascal (MPa); F is the maximum force in Newtons, and A is the surface area of the groove (1000 mm^2).

All data obtained were analyzed with an ANOVA ($p < 0.05$) using Statistical Analysis System (SAS) software 9.3 (USA).

Determination of manufacturing costs: The manufacturing cost in the development of a material is a basic factor that informs decisions on its potential use in specific applications. This work attempted to estimate the manufacturing cost of aluminum-laminated panels. Cost analysis was carried out based on the technical cost modelling approach of Wakeman and Manson 2004 (Fig. 4.2), which considers all resources consumed in the manufacturing process of the panels (both variable and fixed costs).

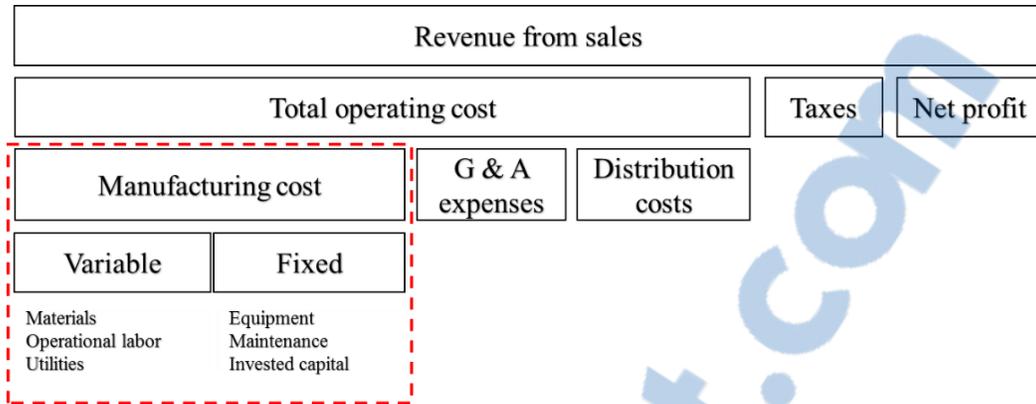


Figure 4.2: Approach for estimation of manufacturing cost of aluminum-laminated panels

Variable costs are directly dependent on production and include the cost of materials (aluminum alloy sheet, wood-based composite, degreasers, and polyurethane adhesive) and utilities. Variable costs also include processing costs (operational labor) of each stage of the manufacturing process including sanding, cleaning, bonding, pressing, and trimming (Fig. 4.3). Fixed costs include mainly equipment, maintenance, and invested capital, which are not dependent on production.

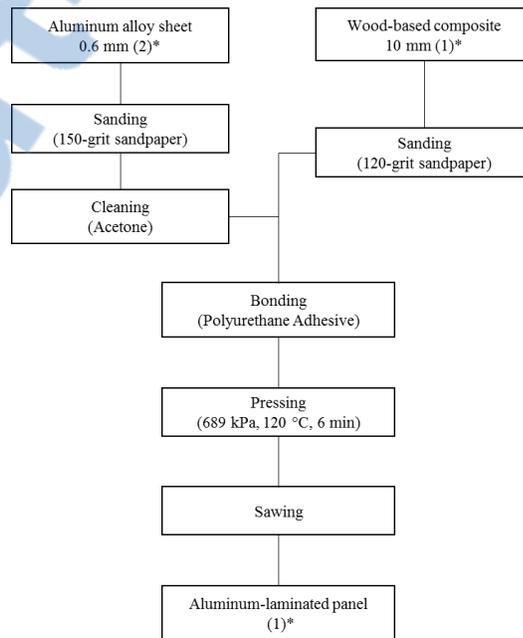


Figure 4.3: Manufacturing process of aluminum-laminated panels. *Quantity of material

The manufacturing cost was estimated per square meter of aluminum-laminated panel considering a total production of 45,000 m²/year. The variable costs were divided into material costs and processing costs for 2013. Wood-based composite cost was estimated based on a thickness of 3/8 inches (9.525 mm), using information published by Spelter *et al.* (2006) and RISI (2013). Aluminum alloy sheet cost was estimated at 70% of the retail price. The polyurethane adhesive cost was estimated in 6.5 CAD/Kg; this and the degreasing cost were estimated based on inquiries with a vendor.

A limitation to the accuracy of results from processing costs was the level of information available for each process of the bonding and pressing of aluminum-laminated panels. Although limited in accuracy, this evaluation provides an order of magnitude of the aluminum-laminated panel for the purpose of identifying potential applications.

4.6. Results and Discussion

4.6.1. Physical Properties

Various physical properties of wood-based composites and aluminum-laminated panels such as TS, WA, and LE were studied in order to compare their technical performance when exposed to wet environmental conditions. The results are presented in Table 4.2.

Thickness swelling (TS) and water absorption (WA): As expected for wood-based composites (without lamination), the dimensional stability after 24-h water soaking of plywood was higher compared with the other wood-based composites. The TS values of wood-based composites decreased with lamination with aluminum alloy sheets (Table 4.2), except for MDF. The TS value of R-HDF was 24 times lower than that of HDF, the TS value of R-OSB was six times lower than that of OSB, while the TS value of R-PW was 2.8 times lower than that of PW. This decrease in TS values was mainly caused by the reduced water penetration into the wood-based composite with aluminum lamination. The WA values of wood-based composites also decreased with aluminum alloy sheet lamination. These results are in concordance with previous studies (Cai 2006; Büyüksari *et al.* 2012). In the case of WA values, R-HDF presented the lowest WA value compared with the other wood-based composites with or without lamination (Table 4.2) for 24-h

water soaking. The WA value of R-HDF was 8.5 times lower than that of HDF, the WA value of R-OSB was three times lower than that of OSB, while the WA value of R-PW was 2.9 times lower than that of PW. The WA values of MDF and R-MDF presented no significant difference. These results could be caused by fractures, which were observed in the MDF-core. These are thought to have occurred at the moment of laminating at 689 kPa the aluminum foils, although the pressure level used was lower than that for MDF lamination with polyvinyl chloride film used in Kilic *et al.* (2009). Additional laminated MDF-core panels were compressed in a hot press at 413 kPa and 138 kPa. These laminated panels did not show delamination on the wood-based composite. The TS and WA values of these laminated panels were lower than for MDF without lamination. No delamination between the aluminum alloy sheets and the wood-based composite was observed after 24-h water soaking, which suggests strong bonding.

Table 4.2: Physical property values of wood-based composites with and without the lamination of aluminum alloy sheets

Wood Composites	Symbol	Thickness (mm)	Physical Properties							
			Density ¹ (kg/m ³)	2-h Water Soak			24-h Water Soak			Linear Expansion Coefficient ¹ (β) (%) 50% to 80% RH
				MC (%)	TS ¹ (%)	WA weight ¹ (%)	MC (%)	TS ¹ (%)	WA weight ¹ (%)	
High-density fiberboard	HDF	9.74	817 A	10.0	2.95	12.14 A	23.4	9.30 A	14.04 A	0.19 A
Laminated high-density fiberboard	R-HDF	10.82	1029 Ba	4.6	---	0.45 Ba	5.9	0.38 Ba	1.65 Ba	0.00 Ba
Medium-density fiberboard	MDF	9.99	798 A	14.5	3.17 A	4.59 A	33.7	14.25 A	22.05 A	0.16
Laminated medium-density fiberboard	R-MDF	10.89	1012 Ba	7.5	1.05 Aa	2.74 Ab	25.2	16.17 Ab	19.70 Ab	---
Oriented strand board	OSB	10.57	660 A	20.1	3.88 A	10.23 A	47.4	14.81 A	35.28 A	0.06
Laminated oriented strand board	R-OSB	11.47	886 Bb	7.0	0.81 Ba	2.77 Bb	15.9	2.46 Ba	11.37 Bc	---
Aspen plywood	PW	9.17	542 A	31.0	2.18 A	15.42 A	55.2	4.61 A	36.75 A	0.06 A
Laminated aspen plywood	R-PW	10.15	800 Bb	10.4	0.07 Ab	10.43 Bc	19.6	1.65 Ba	12.73 Bd	0.01 Ba

--- These data were not considered because of issues with the specimens.
¹Means within a column followed by the same letter are not significantly different at the 5% probability level. Uppercase letters are for comparison between each pairing of wood composites (non-laminated and laminated). Lowercase letters are for comparison between all aluminum-laminated panels.

Linear expansion: The linear expansion coefficients (β) of wood-based composites were improved by lamination with aluminum alloy sheets (Table 4.2). The laminated HDF- and plywood-core panels presented the lowest linear expansion coefficients (β) in relation to other non-laminated wood-based composites. The β values of R-HDF and R-PW were 19, 16, 6, and 6 times lower than those of HDF, MDF, OSB, and PW, respectively. The aluminum alloy sheets worked as a barrier to prevent the entry of water vapor into the core. In the case of the R-MDF- and R-OSB-laminated specimens, delamination was observed in the wood-based composites (core layer) during the change of relative

humidity from 50% to 80%. Delamination of the OSB-core and MDF-core on the edge of the specimens caused a decrease in the measure of length specimens. Consequently, the linear expansion coefficients values for R-MDF and R-OSB were discarded.

4.6.2. Mechanical Properties

The results for static bending (E_{app} , MOR), IB strength, edgewise shear strength, and tensile strength of the surface tests are presented in Table 4.3.

Table 4.3: Mechanical property values of wood-based composites with and without lamination with aluminum alloy sheets

Wood Composites	Symbol	Thickness (mm)	Density ¹ (kg/m ³)	Mechanical Properties				
				E_{app} ¹ (MPa)	MOR ¹ (MPa)	IB Strength ¹ (MPa)	Edgewise Shear Strength ¹ (MPa)	Surface soundness ¹ (MPa)
High-density fiberboard	HDF	9.74	817 A	3664 A	28 A	1.08 A	12.20 A	---
Laminated high-density fiberboard	R-HDF	10.82	1029 Ba	20285 Ba	93 Ba	0.99 Aa	10.78 Aa	1.39 a
Medium-density fiberboard	MDF	9.99	798 A	3206 A	25 A	0.71 A	8.24 A	---
Laminated medium-density fiberboard	R-MDF	10.89	1012 Ba	18267 Bb	90 Ba	0.61 Aa	9.70 Aa	0.81 b
Oriented strand board	OSB	10.57	660 A	5497 A	27 A	0.43 A	7.96 A	---
Laminated oriented strand board	R-OSB	11.47	886 Bb	17354 Bb	61 Bb	0.37 Ab	11.51 Ba	0.96 b
Aspen plywood	PW	9.17	542 A	8977 A	68 A	2.26 A	7.48 A	---
Laminated aspen plywood	R-PW	10.15	800 Bb	19323 Ba	125 Bc	2.48 Ac	13.26 Bb	1.88 c

--- Tests not carried out on wood-based composites.
¹Means within a column followed by the same letter are not significantly different at the 5% probability level. Uppercase letters are for comparison between each pairing of wood composites (non-laminated and laminated). Lowercase letters are for comparison between all aluminum-laminated panels.

Bending properties: Bending mechanical properties such as E_{app} and MOR were strongly influenced by lamination with aluminum alloy sheets. The E_{app} values significantly increased for all laminated panels in comparison with non-laminated wood-based composites (Fig.4.4). The E_{app} values of R-HDF increased by 554% when compared with HDF, while E_{app} values of R-MDF, R-OSB, and R-PW increased by 570%, 316%, and 215%, respectively in comparison with non-laminated wood-based composites. This increase can be explained mainly by the high modulus of elasticity of the aluminum alloy sheets, by their thickness, and also by their location in the composite. When a laminated panel is under pure bending, the face sheets contribute more significantly to the bending properties. Stress in tension and compression is applied to the face sheets, consequently the face sheets need to be strong to be able to support the bending load. In that context, the core material contributes to the thickness of the laminates more than anything.

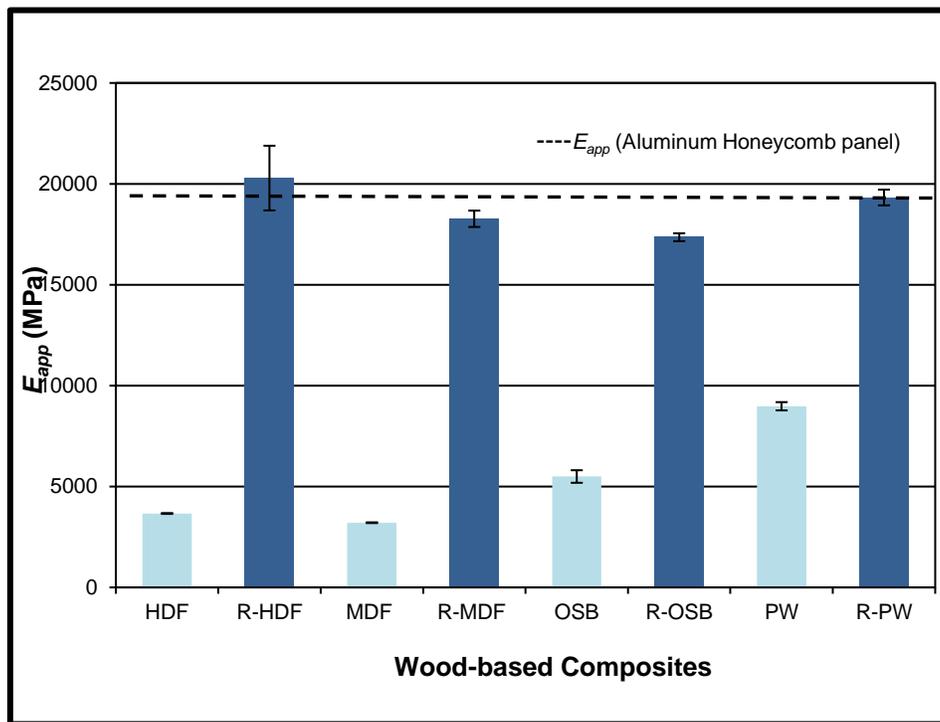


Figure 4.4: Effects of aluminum alloy sheets on the E_{app} of wood-based composites. E_{app} values are the average of 12 replications for each laminated panel and of six replications for each non-laminated wood-based composite.

The MOR values showed a similar trend to those observed for E_{app} . MOR values significantly increased for all aluminum-laminated panels (Fig. 4.5). Laminated plywood-core panel presented an increase of 185% compared with plywood without lamination. The MOR values of laminated panels with HDF, MDF, and OSB core were increased by 335%, 366%, and 225%, respectively, as shown in Fig. 4.5. R-PW yielded the MOR with the highest value, while the R-MDF and R-HDF presented lower values. Finally, the R-OSB presented the weakest MOR values. The increase in average E_{app} and MOR values obtained with aluminum alloy laminates proved significantly higher than the gains reported in the literature with other types of laminates such as fiberglass, wood veneer sheets, or densified wood veneer sheets (Biblis *et al.* 1996; Biblis and Carino 2000; Cai 2006; Ayrimis *et al.* 2008; Manalo *et al.* 2010). The increase in E_{app} and MOR values can be explained by the tension and compression strength and the thickness of the aluminum alloy sheets (0.6 mm). As in the previous tests, no delamination was observed between the aluminum alloy sheets and the wood-based cores.

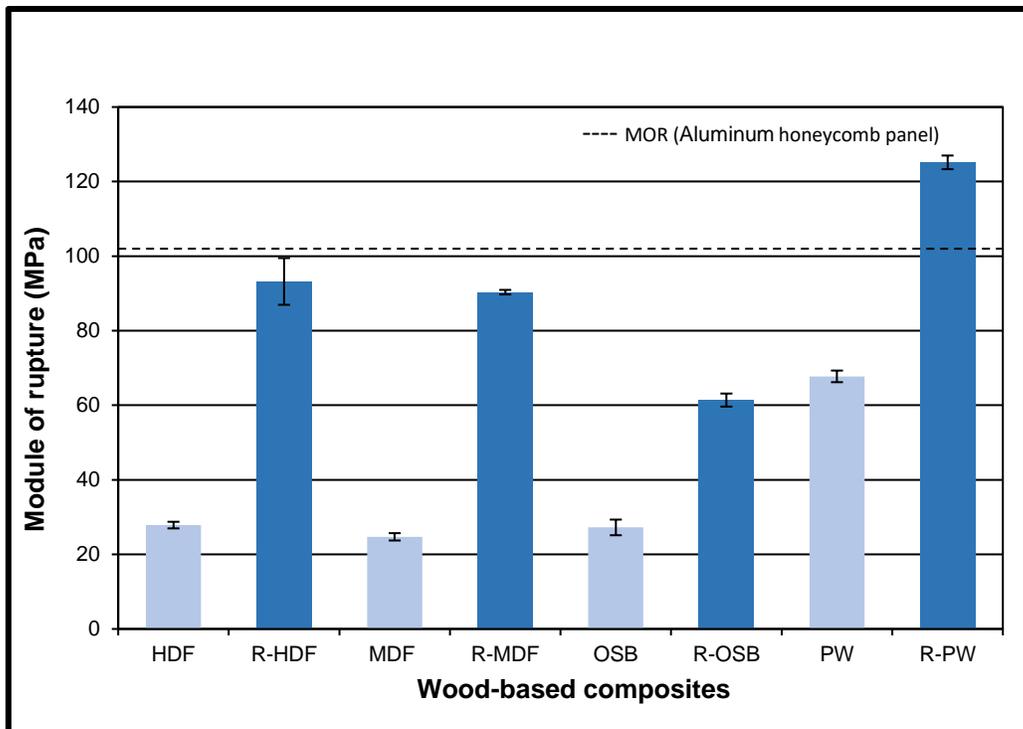


Figure 4.5: Effects of aluminum alloy sheets on the MOR of wood-based composites. MOR values are an average of twelve replications for each aluminum-laminated panel and of six replications for each wood-based composite without lamination.

The E_{app} and MOR values of aluminum-laminated panels were compared with an aluminum honeycomb panel (EC-PI 626AS). The results for three-point static bending tests on the aluminum honeycomb panel (length direction) showed an E_{app} value of 19,570 MPa (± 144) and an MOR value of 102 MPa (± 2). These results are similar to those presented by the aluminum-laminated panels. The E_{app} values were not significantly different from R-HDF, R-MDF, and R-PW panels. The OSB-laminated panel (R-OSB) showed E_{app} values lower than the aluminum honeycomb panels. The MOR values of aluminum honeycomb panel were higher than MOR values of R-HDF, R-MDF, and R-OSB, while they were lower than those of R-PW. In general, tests confirmed the influence of the lamination with aluminum sheet alloy on the improvement of E_{app} and MOR values, and also the limited influence of the type of wood-based composite used as core.

Internal bond strength: Internal bond (IB) tests determined the weakest binding strength within a wood-based composite, normally in the lower-density core layer. According to the results obtained, the IB strength was not affected by the lamination of wood-based composites. There was no significant difference in IB strength between the wood-based composites and the aluminum-laminated panels (Fig. 4.6). During the IB tests, no failure in the interface between the aluminum alloy sheets and the wood-based composites was observed. For all specimens, the failure was in the wood-based composite (core layer). These results are in accordance with an earlier study (Cai 2006). The IB tests confirmed the choice of adhesive polyurethane, although the tensile strength of the surface tests were made to confirm this choice. To extend this work, it would have been interesting to conduct IB tests after 2-h and 24-h water soakings.

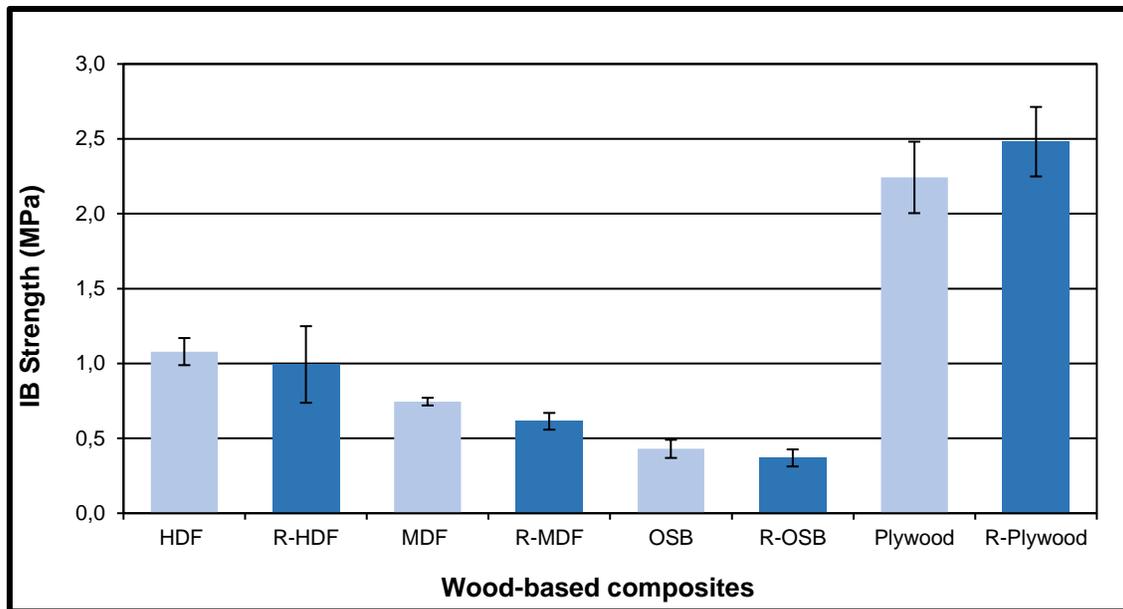


Figure 4.6: IB strength values of laminated panels and wood-based composites without lamination. IB strength values are the average of twelve replications for each laminated panel and of nine replications for each wood-based composite without lamination.

Edgewise shear: The edgewise shear properties of wood-based composites with and without lamination were also studied. Table 4.3 shows the edgewise shear strength values for each type of wood-based composite. The results show that the edgewise shear strength of aluminum-laminated panels R-OSB and R-PW were higher by 44% and 77%, respectively, than non-laminated panels (Fig. 4.7). R-PW showed the highest edgewise shear strength at 13.262 MPa, while R-OSB, R-MDF, and R-HDF presented lower values. These results show that the aluminum alloy sheets positively influenced the edgewise shear strength. This can be caused by the aluminum alloy sheets impeding the propagation and growth of the shear crack of the wood-based composites (Manalo *et al.* 2013). These results could not be compared with edgewise shear tests of aluminum honeycomb panel (EC-PI 626AS) because the shear test presented set-up problems; therefore these data were discarded.

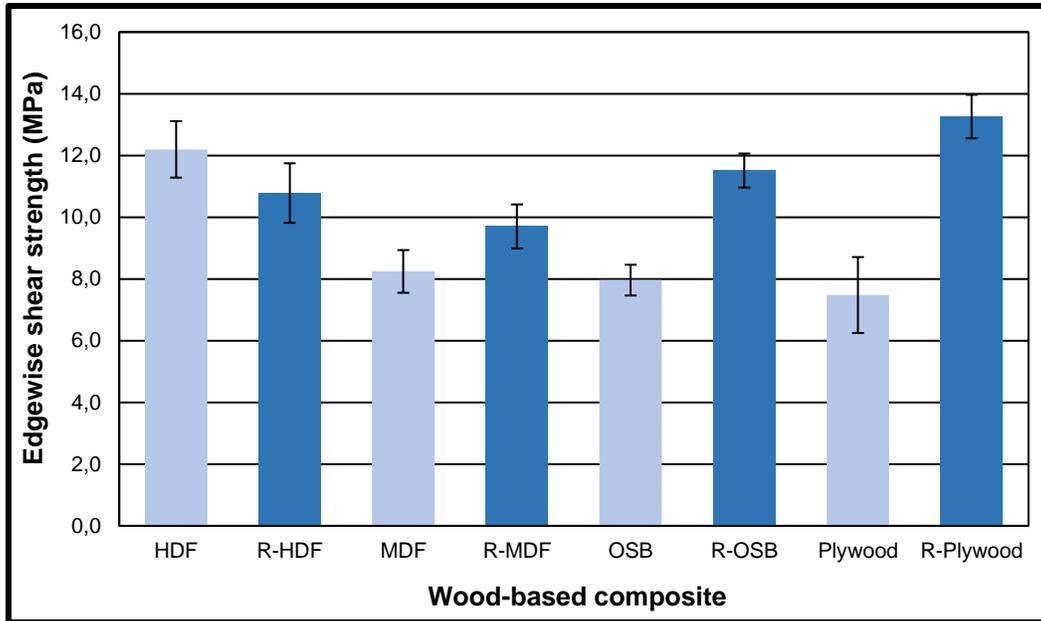


Figure 4.7: Effect of aluminum alloy sheets on the edgewise shear strength of wood-based composites. Edgewise shear values are an average of eight replications for each laminated panel and wood-based composite without lamination.

The Surface Soundness: The IB test results confirmed that no failure existed at the interface between the aluminum alloy sheets and the wood-based composites. These tests were realized specifically from tensile strength between the wood-based composites and the aluminum alloy sheets. The average of surface soundness values also appear in Table 4.3. The laminated HDF-, MDF-, and OSB-core panels presented higher tensile strength values than IB strength values. The failure for tensile strength tests occurred at the surface of the wood-based composites, not in the polyurethane glue line. The R-PW presented the highest values of surface soundness (1.88 ± 0.09 MPa) compared with other aluminum-laminated panels. The R-HDF showed lower values, while the R-OSB and R-MDF presented the weakest values. Face delamination occurred at the adhesive interface. A part of the adhesive remained on the surface of the plywood. The bonding strength between the aluminum alloy sheet and the plywood (as core material) could be improved. The core materials of this study were all sanded at 150-grit in the pretreatment for uniformity and comparison purposes. According to Kilic *et al.* (2009), a sanding treatment of plywood using 240-grit sandpaper is necessary to achieve higher bonding strength, although in his study, the tests specimens were MDF overlaid with polyvinyl chloride film.

4.6.3. Cost Assessment of Aluminum-laminated Panels

Table 3.4 shows the estimated manufacturing costs of aluminum-laminated wood-based panels. Aluminum alloy sheet represents approximately 44% of the total estimated cost, while wood-based composites represent between 6% and 9% of estimated costs varying with the wood-based composite used as core. Aluminum-laminated panels present a low estimated total cost compared with aluminum honeycomb sandwich panels (300 Canadian Dollars/m²). The latter panel is used in aerospace applications; its overall density is low but its cost is much higher. The aluminum-laminated panel can also be compared with aluminum-plastic panel used in exterior walls and indoor decoration. These present similar costs (5 to 20 Canadian dollars/m²), but their mechanical properties are inferior to aluminum-laminated panels. These comparable panels provide benchmarks to speculate against seeking proper applications for aluminum-laminated panels.

Table 4.4: Estimated manufacturing cost of aluminum-laminated panels

Manufacturing Cost of Aluminum-laminated Panel (Canadian dollars/Square meter/10 mm)						
Variable Costs		Quantity	R-HDF	R-MDF	R-OSB	R-PW
Materials						
	Aluminum alloy sheet (2 face sheets)	2 m ²	14.09	14.09	14.09	14.09
	Wood-based composite	1 m ²	2.94	2.87	1.76	3.20
	Polyurethane adhesive	130 g/m ²	1.69	1.69	1.69	1.69
	Subtotal		18.72	18.65	17.54	18.98
Processing (operational labor)						
	Aluminum alloy sheet sanding-cleaning	1 m ²	2.50	2.50	2.50	2.50
	Wood-based composite sanding	1 m ²	2.26	2.26	2.26	2.26
	Aluminum-laminated composite bonding (2 face sheet)	2 m ²	1.60	1.60	1.60	1.60
	Aluminum-laminated wood composite pressing-trimming	1 m ²	3.77	3.77	3.77	3.77
	Subtotal		10.13	10.13	10.13	10.13
Fixed costs		1 m ²	4.33	4.32	4.15	4.37
Total cost (CAD)		1 m ²	33.18	33.10	31.82	33.48

4.7. Conclusions

1. The aluminum-laminated panels showed excellent dimensional stability. The thickness swelling and water absorption values were clearly reduced as a result of the barrier to water penetration provided by the aluminum alloy sheets, except for laminated MDF-core panel, where the lamination process potentially induced fractures at the core where water could penetrate. The linear expansion coefficients (β) of laminated HDF- and plywood-core panels were also reduced as a result of lamination with aluminum alloy sheets.
2. The aluminum-laminated panels exhibited significantly greater E_{app} and MOR values in comparison with non-laminated wood-based composites. Bending properties were in the range of the performance of honeycomb aluminum sandwich panels. The E_{app} values were increased for laminated HDF-, MDF-, OSB-, and plywood-core panels by 554%, 570%, 316%, and 215%, respectively, and the MOR values were increased by 335%, 366%, 225%, and 185%, respectively.
3. The edgewise shear strength values of aluminum-laminated panels with a OSB, and Plywood core were increased by 44%, and 77%, respectively, compared with non-laminated wood-based composites.
4. The absence of IB failure at the aluminum/wood interface demonstrated proper polyurethane adhesive bonding, a result that was confirmed by the tensile strength tests perpendicular to the surface. However, the laminated MDF-core panels presented a decrease in IB values because of fractures in the core layer during the lamination process; one possible solution would be to apply less pressure during lamination, but enough to insure good bonding strength.
5. From the results of this study, it can be concluded that the physical and mechanical properties of wood-based composites were greatly improved by lamination with aluminum alloy sheet, opening the door to a new range of applications such as building interiors and exteriors, floor panels for buildings and transport vehicles, advertising panels, *etc.* The results confirm that aluminum-laminated panels have the potential to

act as a structural material. Comparisons with an aluminum honeycomb panel showed similar mechanical performance.

6. Honeycomb panels are three times lighter, which is an advantage where weight is of importance. Nevertheless, aluminum-laminated wood-based panels show much lower manufacturing costs in comparison. Other desirable properties can be expected from these aluminum-wood panels, such as screw-ability, machinability, punching, and slotting, but these would have to be verified.

Chapitre 5 Life cycle assessment contribution in the product development process: Case study of wood aluminum-laminated panel

5.1. Résumé

Les avantages du laminage avec un alliage d'aluminium pour améliorer les propriétés physiques et mécaniques des matériaux composites à base de bois laminés sont maintenant bien documentés. Cet article vise à montrer la contribution de l'analyse du cycle de vie comme un outil pour évaluer et comparer l'empreinte environnementale laissée par le développement de matériaux composites laminés. Le logiciel *SimaPro 8.4*, combiné à la base de données *Ecoinvent*, a été utilisé pour analyser les impacts environnementaux associés à la fabrication des matériaux composites à base de bois laminés avec alliage d'aluminium. La méthode d'impact 2002+ a été utilisée pour évaluer les impacts environnementaux. Les résultats montrent que la fabrication des matériaux composites laminés avec alliage d'aluminium présente un impact environnemental plus faible que la fabrication de panneau nid d'abeille en aluminium. Les émissions associées à la fabrication de tôles d'aluminium ont joué un rôle important dans la production d'impacts environnementaux pour les matériaux composites laminés. La fabrication de matériaux composites à base de bois présente des avantages environnementaux par rapport à la fabrication de nids d'abeilles en aluminium dans toutes les catégories de dommages causés à l'environnement, sauf dans la catégorie « qualité de l'écosystème ». Ces résultats représentent une opportunité de diminuer l'impact environnemental dans certains cas où des panneaux alvéolaires en aluminium sont utilisés, par exemple, dans le transport terrestre.

5.2 Abstract

The benefits of aluminum lamination in improving the physical and mechanical properties of wood-based composites is now well documented. This paper show the contribution of life cycle assessment (LCA) as a tool to assess and compare the environmental footprint in the development of laminated panels. SimaPro 8.4 software, using Ecoinvent database was utilized to analyze the environmental impacts associated with the manufacturing of wood aluminum-laminated (WAL) panels and aluminum honeycomb panel (AHP). The impact 2002+ method was used to estimate environmental impacts. The LCA results show that WAL panels manufacturing had lower environmental impact than AHP manufacturing. In term of product, wood-based composite were the best choice as core in laminated panels manufacturing. Wood-based composite manufacturing showed environmental advantages in all damage categories except in ecosystem quality. Aluminum alloy sheets manufacturing played an important role in the generation of environmental impacts for laminated panel development.

5.3. Introduction

Life cycle assessment (LCA) is widely accepted in manufacturing industries as the most important way to integrate environmental concerns into product development (Nielsen and Wenzel 2002). Chang et al. (2014) identified the importance of LCA approach in the different stages of the product development process: concept design, part design, process design and decision-making. During each stage of the product development process, aspects such as technical, ergonomic, economic, health and environmental properties are taken into account for the development of the final product (Nielsen and Wenzel 2002). The applications of LCA come in different forms such as impact assessment, selection, classification and decision support (Chang et al., 2014). The main benefit of using LCA in composites development is that it provides comprehensive way of determining the total environmental impact for designing new materials and processes (La Rosa and Cicala 2015). The LCA methodology is an important tool to assist in ensuring proper sustainability through assessing the environmental burdens associated with the development of a product (Bovea and Vidal 2004). This methodology is a useful tool for choosing clean production processes, avoiding hazardous and toxic materials, maximising the efficiency of the energy used for production and for the product in use and designing for waste management and recycling (La Rosa and Cicala 2015).

The province of Quebec (Canada) is a world-leading producer of aluminum and wood-based composites. The wood aluminum-laminated (WAL) panels that involve the use of those materials has the potential to bring new opportunities for innovation to the local industry. A competitive advantage would be the good environmental performance of WAL panel in comparison to other materials. Wood-based composites panels present variable physical and mechanical properties, as a result of their structure and process engineering as well as, these engineering process also can improve the environmental performance and sustainability of wood-based composites (González-García et al., 2009).

Among the main types of wood-based composites panels produced are the high-density fiberboard (HDF), medium-density fiberboard (MDF), oriented strand board (OSB), particleboard (PB) and plywood. Wood-based composites panels offer good properties

but also certain weaknesses such as their limited mechanical properties, poor water resistance, dimensional instability and limited durability. These properties limit their use in applications involving exposure to wet environment conditions. Many high performance laminated panels (sandwich structures) are available, these are widely used in aircraft, automotive, marine, and other structural applications where strength, stiffness and weight efficiency are required and where the environmental conditions (temperature, flammability and moisture/humidity) play an important role in the selection of materials. Different material combinations from cores and face sheets have been developed. Some are polymer, fiber or metal based. Among the properties of these laminated panels, high mechanical properties, high strength/weight ratio and dimensional stability are differentiating properties. Most of these panels are presenting some better properties than usual wood-based composite but at a much higher price per square meter. In order to allow wood-based composite to reach some application associated to these high performance panels a wood aluminum-laminated panel has been developed (Segovia et al., 2015), which have involved, apart from the study of their physical and mechanical properties, the study of their environmental performance assessment.

Several studies have been carried out to analyses environmental performance assessment of various wood-based composites. HDF and MDF panels have been studied extensively (Puettmann et al., 2103a; Rivela et al., 2007; Wilson, 2008; Gonzalez-Garcia et al., 2009; Zeller et al., 2015). Similarly, OSB panel, which is an engineered structural-use panel has also been studied (Kline, 2005; Puettmann et al., 2013c) as well as plywood (Puettmann et al., 2013b). One of the environmental advantages of wood-based composites manufacturing is the utilization as energy of the combustion of wood fuel (biomass), which is normally composed of wood residues (wood and bark), generated during their manufacture. For instance, the fact most outstanding of OSB manufacturing is that 89.6% of heat energy used is generated on-site from combustion of wood residues (Kline, 2005). For (Puettmann et al., 2013c) this heat energy represents about 38% of the total energy from cradle-to-gate of OSB panel, while in (Puettmann et al., 2013b) the energy generated by renewable fuels, such as woody biomass, represents about 56 % of the total energy from cradle to gate from softwood plywood. In this softwood plywood case, of total CO₂ emissions, 69 % were CO₂ biogenic based emissions from the combustion of wood fuel

(Puettmann et al., 2013b). The use of wood for fuel as an energy source plays a significant and favorable environmental role. Emissions of CO₂ biogenic due to the combustion of wood, are often referred to as having a neutral impact on global warming (EPA, 2014). Among other sources, this is acknowledged by the United States Environmental Protection Agency; whereas CO₂ due to the combustion of fossil fuels contribute significantly to global warming (Wilson, 2008). Although there is still some level of controversy about this issue, the conditions allowing the realization of carbon emission benefits are increasingly well known (Beauregard et al., 2012). However, the use of petroleum-based adhesives (amino resins) in the manufacturing of wood-based composites is considered the main source of environmental impact (Dos Santos et al., 2014). Amino resins are formaldehyde-based materials providing strength and resistance. Urea formaldehyde (UF) resins are used for interior products, melamine urea formaldehyde (MUF) resins and phenol formaldehyde (PF) resins are used for exterior products. Within the petroleum-based adhesives, the MUF shows a higher carbon footprint in comparison with other types of adhesives such as PF, phenol resorcinol formaldehyde or UF (Wilson, 2010). Formaldehyde air emission decreases as the melamine content increases in the MUF, which is one of the key environmental problems of formaldehyde-based resins (Silva et al., 2015).

Several studies have been conducted to determine the environmental impact of other natural fiber based composite panels using the life cycle analysis methodology (Batouli et al., 2014; Song et al, 2009; Xun et al, 2008; Umair, 2006; La Rosa et al., 2014). According to these studies, the composite panels made with natural-based polymers shows favorable results in terms of environmental impact and energy consumption in comparison with petroleum-based panels, but in both composite panels the use of epoxy resin was the major contribution to the environmental impact, up to more than 85% (La Rosa et al., 2014). However, the use of wood fibers as reinforcement in composite panel shows environmental advantage compared with the polypropylene (Xun et al., 2008). The use of balsa wood as core in laminated panels shows also environmental advantages compared to polyvinyl chloride or steel (Umair, 2006).

As mentioned previously, the laminated materials used as face sheet or skin are many, including glass, carbon fiber or metals. Among the metals, of interest is aluminum. The aluminum is the second most used metal after steel, and in the last decades its use has increased due to his versatile properties (Liu and Müller, 2012). The environmental impact caused by the production of aluminum has been studied extensively to improve the smelting technologies, energy consumption, solid waste management and raw material consumption worldwide (Tan and Khoo, 2005; Norgate et al., 2007; Sevigné-Itoiz et al., 2014; Liu and Müller, 2012; Hong et al., 2012; Zhang et al., 2017). LCA studies on aluminum production showed different results possibly because of the limited geographical life cycle scope and differentiated system boundaries, popularity to use industry-wide inventory data, and predominant focus on green-house gas emissions (Zhang et al., 2016). Generally, the aluminum production requires much more energy than other metals and causes large amounts of greenhouse gas emissions (Norgate et al., 2007), when fossil fuel, black coal, or natural gas are used, which is not the case when hydroelectricity is used such as in the jurisdiction of Quebec. Energy conservation and emissions reduction have long been a key concern for the sustainability of aluminum industry (Liu and Müller, 2012). Consequently, the aluminum alloy made from secondary, recycled aluminum presents environmental and economic benefits compared to primary aluminum, due to much reduced electricity consumption and global warming gas score respectively (Hong et al., 2012; Aluminum Association, 2013). Furthermore, aluminum can be recycled almost indefinitely.

The current paper aims to determine the importance of the LCA approach in the development process of WAL panels. The present attributional LCA study compare WAL panel manufacturing with different types of cores (MDF, OSB and plywood) and the aluminum honeycomb panel (AHP) manufacturing since their physical and mechanical properties were established as similar (Segovia et al., 2015), according to a cradle-to-gate approach. The assessment of the environmental impacts of laminated panels through a LCA methodology will allow to identify the environmental hotspot of each panel throughout the manufacturing process and to explore the opportunities for environmental improvements of WAL panels. The results of the comparative LCA study will allow decision-making considering highlight environmental impact of WAL panels compared

to AHP within of the framework of the product development process. Future work should demonstrate the advantages of using WAL panels in different potential applications.

5.4. Methodology: life cycle assessment (LCA)

Environmental performance analysis of WAL panel and AHP have been carried out according to the LCA following standards (ISO 2006a) and (ISO 2006b). LCA typically includes the following four phases: goal and scope definition, inventory analysis, life cycle impact assessment and interpretation phase (ISO 2006a). This LCA study has been modelled using SimaPro 8.4 software with database support from Ecoinvent v3.0 (Ecoinvent center, 2015).

5.5. Goal and scope of the study

5.5.1.1. Functional unit (FU)

In LCA, the FU is defined to quantify the function of a product system. This provides the reference for inputs and outputs (ISO 2006a). In this paper, the functional unit was defined as the manufacture of laminated panel of one square metre per 10 mm of thickness able to withstand a load of 6.0 kgf/mm^2 , as an interior floor.

5.5.1.2. Definition of system boundary from cradle-to-gate

As the purpose of this is to assess the contribution of LCA in the product development process and taking into account that predicting the end-of-life of such product is highly uncertain, the analysis is delimited by cradle-to gate system boundaries. Consequently, raw material extraction, manufacturing of components (wood-based composite, aluminum alloy sheet and adhesive), and manufacturing of laminated panels are included in the modelling. The system boundaries for both products are shown in Fig. 5.1.

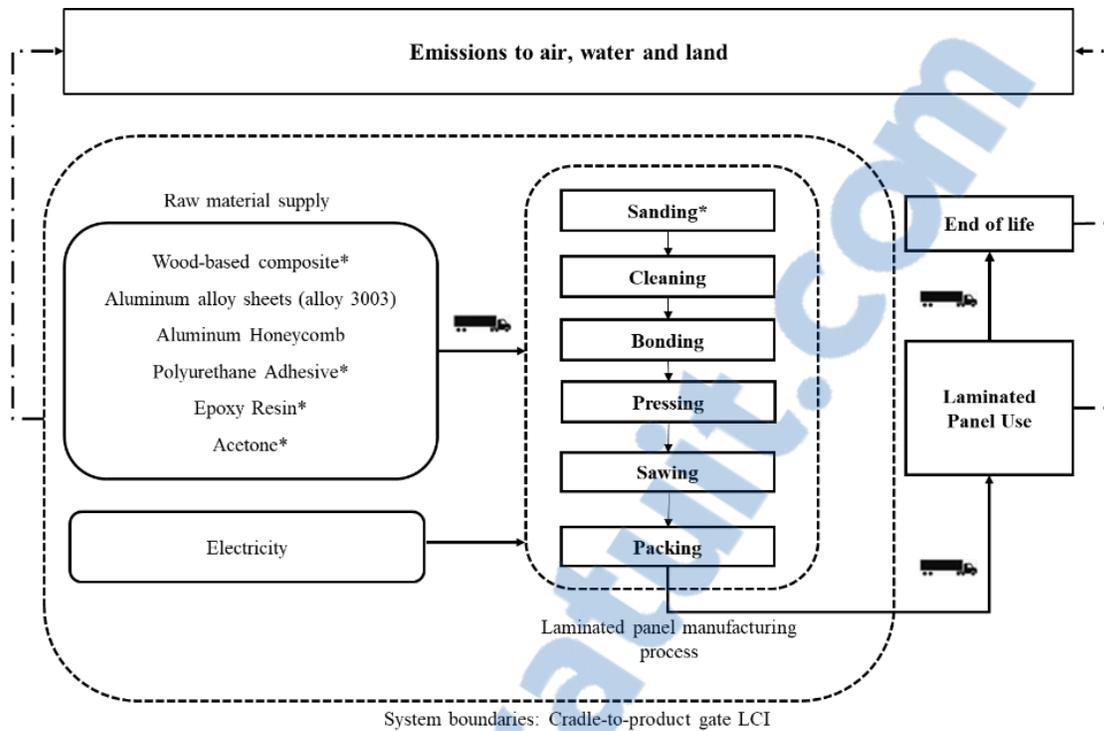


Figure 5.1: Cradle-to-gate Life cycle boundaries of wood aluminum-laminated panels and aluminum honeycomb panel.*WAL panels manufacturing.

5.5.1.3. Description of the studied panels

Three WAL panels with three different cores, MDF, OSB and plywood, were produced. The wood panels are laminated with two aluminum alloy sheets to form a sandwich structure (Fig. 5.2a). For comparison, an aluminum honeycomb panel (AHP) was also studied. These four laminated panels presented similar physical and mechanical properties.

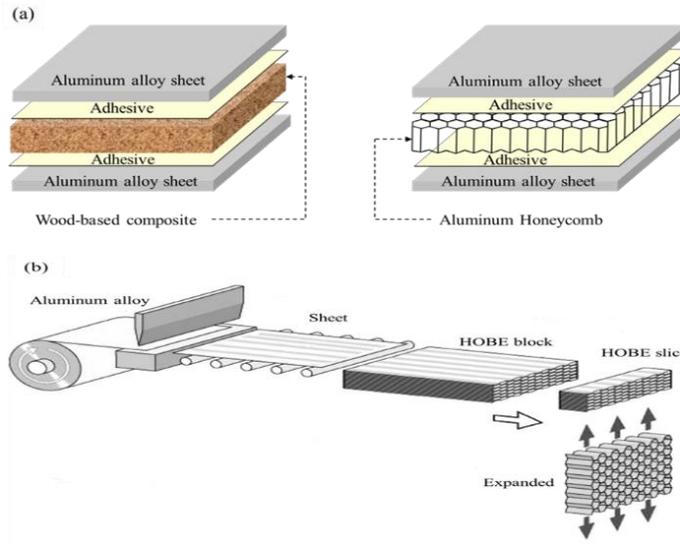


Figure 5.2: (a) Typical layout of wood aluminum-laminated panel and Aluminum honeycomb panel. (b): Aluminum honeycomb manufacturing process

The main physical and mechanical properties of the WAL and aluminum honeycomb panels are presented in Table 5.1. The properties were determined according to ASTM Standard D1037.06a (ASTM 2012) in Segovia et al., (2015).

Table 5.1: Physical and mechanical properties of the WAL panels and AHP

Main features	Wood Aluminum-laminated Panels			Aluminium Honeycomb Panel
	MDF	OSB	Plywood	Aluminium Honeycomb
Core material	MDF	OSB	Plywood	Aluminium Honeycomb
Thickness (mm)	10.89	11.47	10.15	10.00
Face sheet thickness (mm)	0.6	0.6	0.6	0.6
Physical Properties				
Areal Weight (kg/m ²)	10.50	11.47	10.15	4.60
Thickness swelling (%) (24-h water soaking)	16.17	2.46	1.65	---
Water absorption (%) (24-h water soaking)	19.70	11.37	12.73	---
Mechanical Properties				
Module of elasticity (MPa)	18267	17354	19323	19570
Module of rupture (MPa)	90	61	125	102

5.5.1.4. Description of manufacturing process of the wood aluminum-laminated panel

Wood-based composite manufacturing: WAL panel were manufactured with three types of wood-based composite panels used as cores (MDF, OSB and plywood). The wood-based composites panels were obtained on the market as produced by the manufacturers. Wood-based composites are usually manufactured by mixing wood particles, flakes or fibres together with resin. This mixture is formed into a sheet, which is compressed with heat to cure the resin and to determine the final thickness of the panel.

The processes for producing wood-based composite materials can be found in Stark et al., (2010). MDF is frequently used in place of solid wood, plywood, and particleboard in many furniture applications. It is also used for interior door skins, mouldings, and interior trim components. MDF manufacturing includes the residues (shavings, sawdust, ply trim, and chips), transportation delivery of residues, operations as screening, digesting, disk refining, blending, drying, forming, pre-pressing, mat trimming, hot pressing, panel conditioning, sawing, sanding, packaging, and materials such as resin and wax. OSB are usually made up of three layers of strands aligned in the long-direction of the panel and a core layer that is counter-aligned or laid randomly using the smaller strands or fines (Stark et al., 2010). OSB manufacturing panel include forestry operations, round wood transportation, operations as log handling, flaking, drying, screening, blending, mat formation, hot pressing, finishing, packaging, and materials as resin and wax. The plywood is a panel built up wholly or primarily of sheets of veneer called plies. It is constructed with an odd number of layer with the grain direction of adjacent layers oriented perpendicular to one another (Stark et al., 2010). The plywood manufacturing include also forestry operations, roundwood transportation, operations as bucking, debarking, block conditioning, peeling, clipping, drying, hot pressing, trimming, sawing, packaging, and materials as resin. The wood-based composite manufacturing process also requires heat and electrical power.

Aluminum alloy sheet manufacturing: Aluminum alloy sheets 3003 were used as face sheet. Aluminum alloy sheet manufacturing process includes mining bauxite, primary

aluminum production, aluminum alloy production, aluminum sheet production, and transport. The aluminum is produced from bauxite (primary). Virtually all the world's primary aluminum is produced via the well-established Bayer process for alumina from open-pit mined bauxite, followed by Hall-Héroult electrolysis (Liu and Müller, 2012). The aluminum smelters produce primary aluminum with 99.7-99.9% purity. The main impurities are iron and silica. Alloy elements are added to improve the mechanical strength of pure aluminum, the aluminum alloy production process include the use of chemical components. Approximately fifteen elements are used in various combination, but six or seven are more important (copper, manganese, silicon, magnesium, zinc). The pure aluminum is maintained at temperature between 650 °C to 800 °C. Alloy elements are previously mixed according to the recipe are added to pure aluminum. The aluminum alloy is purified by injecting a gas and finally this is deposited in moulds. The aluminum alloy sheet production includes the process of ingot aluminum cleaning to remove the oxide layer. The ingot is then heated between 350 °C to 550 °C and press rolled to produce a sheet of the final thickness. When thinner sheets are required, the aluminum alloy sheet must be compressed in cold rolls to less of 60 °C (Beaulieu, 2013).

Wood Aluminum-Laminated panel manufacturing: The aluminum alloy sheets were sanded with a 150-grit sandpaper and cleaned with acetone for degreasing. Wood-based composites were sanded with a 120-grit sandpaper. A liquid polyurethane adhesive (Macroplast UR-8346) provide by Henkel Corporation was applied at a spread rate of 130 g/m². Two aluminum alloy faces and one wood-based composite were assembled in a Dieffenbacher laboratory hot press at 689 kPa and 120 °C for six minutes to ensure full curing of the adhesive. The production flow of the WAL panel manufacturing can be seen in Fig. 5.1. The manufacturing process was modeled (Fig. 5.1) based on actual laboratory procedures. The modeling includes the packaging of WAL panels.

5.5.1.5. Description of manufacturing process of the Aluminum Honeycomb panel

Aluminum honeycomb manufacturing: The aluminum honeycomb process, using adhesive bonding, is illustrated in Fig.5.2b. The expansion process is a technique used to

make honeycomb, it consists in the printing of lines adhesive on the aluminum sheets cleaned prior to adhesive application. These sheets are cut and stacked, after the adhesive lines are cured under pressure at elevated temperature. The honeycomb before expansion block (HOBE block) is cut into slices according to required thickness. Finally, the aluminum HOBE slices are expanded (Bitzer, 1997).

Aluminum Honeycomb panel manufacturing: The material flow of the AHP manufacturing is illustrated in Fig. 5.1. The aluminum alloy sheets previously cleaned and the aluminum honeycomb are bonded, an adhesive film is placed on the top and the bottom surfaces of the honeycomb, upon which aluminum alloys sheets are placed. This whole assembly is cured also under pressure and high temperature. During the pressing process, the resin flows and creates a bond between the aluminum alloy sheets and the aluminum honeycomb walls.

5.5.1.6. Assumptions and limitation

Various assumptions have been made throughout the life cycle assessment of both panel types (WAL panels and AHP).

- The packing stage has been excluded of assessment of environmental impacts because as they are considered identical for the four types of laminated panels.
- All data for the WAL panel manufacturing process was obtained from laboratory tests and adapted in the modelling to reflect the industrial context.

5.6. Life cycle inventory

Life cycle inventory analysis is carried out in order to quantify the inputs and outputs associated with the life cycle stages of both types of laminated panels. As indicated in Fig. 5.1, the system modelling was divided in two stages for laminated panels manufacturing: the raw materials supply and the laminated panels manufacturing process. The following paragraphs show in detail which data is used for the modelling of the system.

Wood-based composites data: For wood-based composites, the datasets were calculated according to the functional unit (1m² of panel). For MDF panel, the dataset was modified

according to the context of the Province of Quebec, Canada; while for OSB and plywood panels, the dataset was used directly from Ecoinvent, as the latter already contain Quebec specific datasets.

Aluminum alloy sheet data: As in the previous case, the input and output information was obtained from the Ecoinvent database. The datasets were calculated according to functional unit. The chemical composition of aluminum in dataset was modified according to aluminum alloy 3003. This data also includes the transportation phase.

WAL panels and AHP manufacturing data: The input information for both panels was determined based on laboratory work and datasheets. The dataset was calculated according to the functional unit (Table 5.2). The adhesive consumption of WAL panels was calculated in laboratory in previous study (Segovia et al., 2015), while that for aluminum honeycomb panels was obtained of datasheets.

The sanding and pressing parameters and their respective electricity consumption of each machine were calculated in laboratory according to their machine datasheet for each WAL panel. The electricity consumption of each machine for aluminum honeycomb panel was calculated according to machine datasheet and the Province of Quebec energy grid mix.

Table 5.2: WAL panels and AHP manufacturing inventory data (1 m² of laminated panel)

Laminated panels manufacturing		Based on process	Quantity	Source of data
Wood Aluminum-laminated panels				
Raw materials supply				
MDF	Medium density fibreboard {RoW} medium density fibre board production, uncoated Alloc Rec, U		1 m ²	Ecoinvent 3.0*
OSB	Oriented strand board {CA-QC} production Alloc Rec, U		1 m ²	Ecoinvent 3.0
Plywood	Plywood, for outdoor use {CA-QC} production Alloc Rec, U		1 m ²	Ecoinvent 3.0
Aluminum alloy sheets	Aluminium alloy, AlMg3 {CA-QC} production Alloc Rec, U		3.280 kg	Ecoinvent 3.0*
	Sheet rolling, aluminium {CA-QC} processing Alloc Rec, U			Ecoinvent 3.0
Polyurethane	Polyurethane, flexible foam {RoW} production Alloc Rec, U		0.130 kg	Ecoinvent 3.0*
Processes				
Degreasing	Degreasing, metal part in alkaline bath {RoW} processing Alloc Rec, U		2 m ²	Ecoinvent 3.0
Electricity (All processes)	Electricity, medium voltage {CA-QC} market for Alloc Rec, U		6.95 kwh	Ecoinvent 3.0
Aluminum Honeycomb panel				
Raw materials supply				
Aluminum Honeycomb			1 m ²	Built
Aluminum alloy sheets	Aluminium alloy, AlMg3 {CA-QC} production Alloc Rec, U		1.549 kg	Ecoinvent 3.0*
	Sheet rolling, aluminium {CA-QC} processing Alloc Rec, U			Ecoinvent 3.0
Epoxy resin	Adhesive, for metal {RoW} production Alloc Rec, U		0.132 kg	Ecoinvent 3.0
Aluminum alloy sheets	Aluminium alloy, AlMg3 {CA-QC} production Alloc Rec, U		3.280 kg	Ecoinvent 3.0*
	Sheet rolling, aluminium {CA-QC} processing Alloc Rec, U			Ecoinvent 3.0
Epoxy resin	Adhesive, for metal {RoW} production Alloc Rec, U		0.200 kg	Ecoinvent 3.0
Processes				
Degreasing	Degreasing, metal part in alkaline bath {RoW} processing Alloc Rec, U		2 m ²	Ecoinvent 3.0
Electricity (All processes)	Electricity, medium voltage {CA-QC} market for Alloc Rec, U		65.23 kwh	Ecoinvent 3.0

* Adapted to the assessed product

5.7. Life cycle impact assessment method (LCIA)

The results of the LCIA were calculated using the IMPACT2002+ version 2.12 method (Jolliet et al., 2003). This method is one of the most widely used method in LCA analysis. The IMPACT2002+ method suggests a feasible implementation of a combined midpoint/damage approach, linking all types of life cycle inventory results (elementary flows and other interventions) via several midpoint categories to several damage categories. This method defines 15 mid-point categories including carcinogens, non-

carcinogens, respiratory inorganics, ionizing radiation, ozone layer depletion, respiratory organics, aquatic ecotoxicity, terrestrial ecotoxicity, terrestrial acidification, land occupation, aquatic acidification, aquatic eutrophication, global warming, non-renewable energy and mineral extraction.

These mid-point categories are grouped into four damage categories: human health (carcinogens, non-carcinogens, respiratory inorganics, ionizing radiation, ozone layer depletion, and respiratory organics midpoints) expressed in DALY (disability-adjusted life year); ecosystem quality (aquatic ecotoxicity, terrestrial ecotoxicity, terrestrial acidification, and land occupation mid-points) expressed in $\text{PDF}\cdot\text{m}^2\cdot\text{yr}$; climate change (global warming midpoint) expressed in $\text{kg CO}_2\text{-eq}$ and the resources depletion (non-renewable energy and mineral extraction midpoints) expressed in MJ primary.

Sensitivity analysis: The purpose of sensitivity analysis is to show if a change of a certain input parameter affects the results. This paper carried out 2 sensitivity analysis of the results. The first one evaluates the contribution to the environmental impact of aluminium alloy sheet manufacturing. This alternate scenario considered the manufacture of aluminium alloy sheet made from recycled aluminium in replacement to primary aluminum. This scenario has been selected since the use of recycled aluminum is in practice feasible for the considered jurisdiction. A second sensitivity analysis by using TRACI impact method (Bare, 2011) was also carried out. This analysis will be helpful to verify the robustness of the obtained results from IMPACT2002+ method.

5.8. Results and discussion

This study was carried out in order to determine the importance and contribution of LCA in the development process of WAL panels. The comparative LCA identify the environmental hotspots and burdens inside the laminated panels manufacturing process in Québec, according to a cradle-to-gate approach.

5.8.1. Analysis of manufacturing processes of wood-based composite and of aluminum honeycomb panels without lamination.

This study evaluated the environmental impact of manufacturing processes of three wood-based composites and aluminum honeycomb used as core of laminated panels. LCA results (midpoint categories) for 1 m² (1 x 1 x 0.10 m) of laminated panels are shown in Fig 5.3. In twelve of the fifteen mid-point analyzed categories, the aluminum honeycomb manufacturing generated the highest impact in comparison to the wood-based composites manufacturing. In general, the total impact of each wood-based composite manufacturing was 98 to 45% lower than aluminum honeycomb manufacturing in several categories (carcinogens, non-carcinogens, respiratory inorganics, ionizing radiation, ozone layer depletion, respiratory organics, terrestrial acid/nutri, aquatic acidification, aquatic eutrophication, global warming, non-renewable energy, mineral extraction). In aquatic and terrestrial ecotoxicity as in land occupation category the wood-based composites manufacturing generated the highest negative impact in comparison to aluminum honeycomb manufacturing.

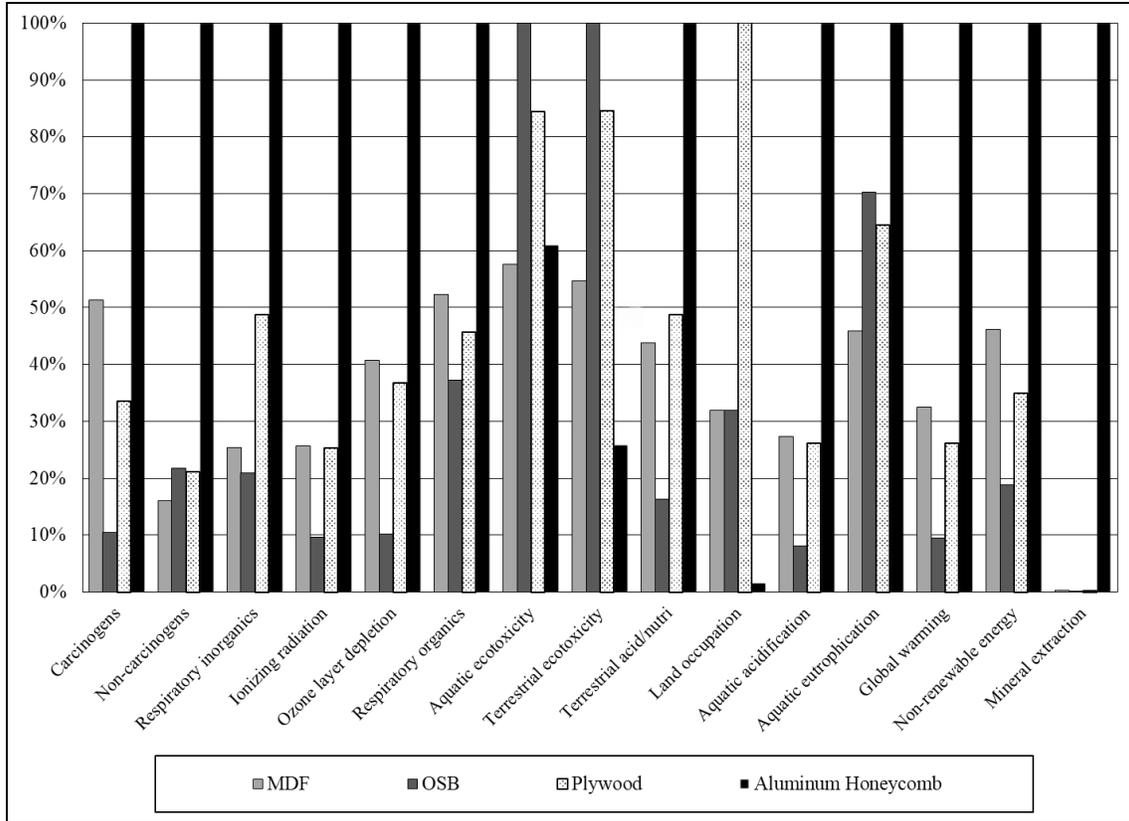


Figure 5.3: Characterization of the midpoint impacts of wood-based composites and aluminum honeycomb manufacturing processes

The analyzed midpoint impact categories are:

Carcinogens category (C): Adhesive production (MUF, UF and PF resins) was the main contributor to negative impact which represented between 66 to 78% of total contributing emissions for wood-based composites. 100% of contributions to this impact category was associated with epoxy resin for aluminum honeycomb.

Non-carcinogens (N-C): Majority of emissions contributing to this impact category were associated with the treatment of wood ash mixture for MDF (52%) and OSB (91%), while heat production from hardwood chips was the main contributor for plywood (84%). For aluminum honeycomb, treatment of red mud from bauxite digestion represented more than 88% of total contributing emissions.

Respiratory inorganics (RI): MUF and UF resins (55%), OSB production (70%), and heat production from hardwood chips (68%) were the main contributors to negative impact for MDF, OSB and plywood respectively. For aluminum honeycomb, 13% and 12% of contributions to this impact category were associated with transport (transoceanic ship) of bauxite and aluminum production respectively.

Ionizing radiation (IR): Electricity was the main contributor to IR which represented 39%, 45% and 57% for MDF, OSB and aluminum honeycomb respectively, while melamine formaldehyde resin was the main contributor for plywood manufacturing (43%).

Ozone layer depletion (OLD): MUF and UF resins (72%), pulpwood hardwood production (41%) and MUF resin (75%) were the main contributor for MDF, OSB and plywood respectively. Heat production from petroleum (39%) was the main contributor for aluminum honeycomb manufacturing.

Respiratory organics (RO): 55%, 41% and 41% of contributions to this impact category were associated with the MDF production (MDF), PF resin (OSB) and saw log and veneer log production (plywood) respectively. 48% of contributions to this category was associated with aluminum primary liquid production for aluminum honeycomb.

Aquatic ecotoxicity (AE): Treatment of wood ash mixture was the main contributor to this category for MDF (72%) and OSB (98%), while heat production from hardwood chips for plywood (93%). For aluminum honeycomb, treatment of red mud from bauxite digestion represented more than 49% of total contributing emissions.

Terrestrial ecotoxicity (TE): Treatment of wood ash mixture was the main contributor to this category for MDF (75%) and OSB (98%), while heat production from hardwood chips was the main contributor for plywood (95%). 43% of contributions to this category was associated with bauxite mine operation for aluminum honeycomb.

Terrestrial acid/nutri (TA/N): 36%, 45% and 52% of contributions to this category were associated with MUF and UF resins (MDF), OSB production (OSB) and MUF resin

(plywood) respectively. For aluminum honeycomb, 26% of contributions to this impact category was associated with transport of bauxite (transoceanic ship).

Land occupation (LO): Wood production (softwood, hardwood and veneer log) was the most effective contributor to LO for MDF (99%), OSB (100%) and plywood (78%).

Aquatic acidification (AA): Adhesive production was the main contributor to AA which represented 63%, 35% and 64% for MDF, OSB and plywood respectively. Aluminum production and transport of bauxite were the main contributor with 19% and 16% respectively, for aluminum honeycomb.

Aquatic eutrophication (AE): Treatment of wood ash mixture was the main contributor to this category for MDF (47%) and OSB (72%), while heat production from hardwood chips was the main contributor for plywood (73%). For aluminum honeycomb, Aluminum primary liquid production represented more than 52% of total contributing emissions.

Global warming (GW): Once again adhesive production was the main contributor to this category (64%, 59% and 76% for MDF, OSB and plywood respectively). 30% of contributions to this category was associated with aluminium production (aluminum primary liquid production).

Non-renewable energy (NRE): Adhesive production was also the main contributor to this category (67%, 65% and 43% for MDF, OSB and plywood respectively). For aluminum honeycomb, hard coal (mine operation) for aluminum production (14%) was the main contributor to this category.

Mineral extraction (ME): Adhesive production was also the main contributor to this category (87%, 72% and 80% for MDF, OSB and plywood respectively). 98% of contributions to this category was associated with bauxite mine operation for aluminum honeycomb.

Table 5.3: Hotspots in wood-based composites and aluminum honeycomb manufacturing processes

Impact Category	Hotspots			
	MDF	OSB	Plywood	Aluminum Honeycomb
Carcinogens	Adhesive production (MUF, UF and PF resins)			Epoxy resin
Non-carcinogens	Treatment of wood ash mixture, pure, landfarming	Treatment of wood ash mixture, pure, landfarming	Heat production from hardwood chips	Treatment of red mud from bauxite digestion
Respiratory inorganics	MUF and UF resins	OSB production	Heat production from hardwood chips	Transport (transoceanic)
Ionizing radiation	Electricity	Electricity	MUF resin	Electricity (Pressing)
Ozone layer depletion	MUF and UF resins	Pulpwood hardwood production	MUF resin	Petroleum and gas production (heat production)
Respiratory organics	MDF production	PF resin	Sawlog and veneer log production	Coke (aluminum primary liquid production)
Aquatic ecotoxicity	Treatment of wood ash mixture, pure, landfarming	Treatment of wood ash mixture, pure, landfarming	Heat production from hardwood chips	Treatment of red mud from bauxite digestion
Terrestrial ecotoxicity	Treatment of wood ash mixture, pure, landfarming	Treatment of wood ash mixture, pure, landfarming	Heat production from hardwood chips	Bauxite mine operation
Terrestrial acid/nutri	MUF and UF resins	OSB production	MUF resin	Transport (transoceanic)
Land occupation	Pulpwood softwood production	Pulpwood hardwood production	Sawlog and veneer log production	Hard coal (mine operation)
Aquatic acidification	Adhesive production (MUF, UF and PF resins)			Aluminum primary liquid production
Aquatic eutrophication	Treatment of wood ash mixture, pure, landfarming	Treatment of wood ash mixture, pure, landfarming	Heat production from hardwood chips	aluminum primary liquid production
Global warning	Adhesive production (MUF, UF and PF resins)			Aluminum primary liquid production
Non-renewable energy	Adhesive production (MUF, UF and PF resins)			Hard coal (mine operation)
Mineral extraction	Adhesive production (MUF, UF and PF resins)			Bauxite mine operation

The adhesive production was the main hotspot in C, AA, GW, NRE, ME categories for wood-based composites manufacturing. This result is in accordance with previous studies in other region, which have also identified certain adhesive as the major contributor to the environmental impact (Dos Santos et al., 2014; Zeller et al., 2015). The quantity and type of adhesive used in the manufacturing of wood-based composites are reflected in the results of impact categories, as shown by Wilson (2010) and Silva et al. (2015). For aluminum honeycomb manufacturing, the emissions associated with aluminum

production was the main hotspot (Table. 5.3), except in the C and IR categories where epoxy resin and electricity (pressing) were the main hotspots respectively. These results are in accordance with the LCA study performed by Aluminum association (2013), which shows that primary aluminum production accounts for more than 50% of environmental impact.

The endpoint level results showed that aluminum honeycomb manufacturing has a greater negative impact in human health, climate change and resources categories (Fig. 5.4). Plywood manufacturing showed greatest negative impact in the ecosystem quality category generated mainly by the impact on the land occupation category associated with the land perturbation during the harvesting step. The plywood manufacturing used 0.021858 m³ of hardwood (saw log and veneer log), while MDF and OSB used 0.014717 m³ (softwood and wood chips) and 0.009579 m³ (hardwood) respectively.

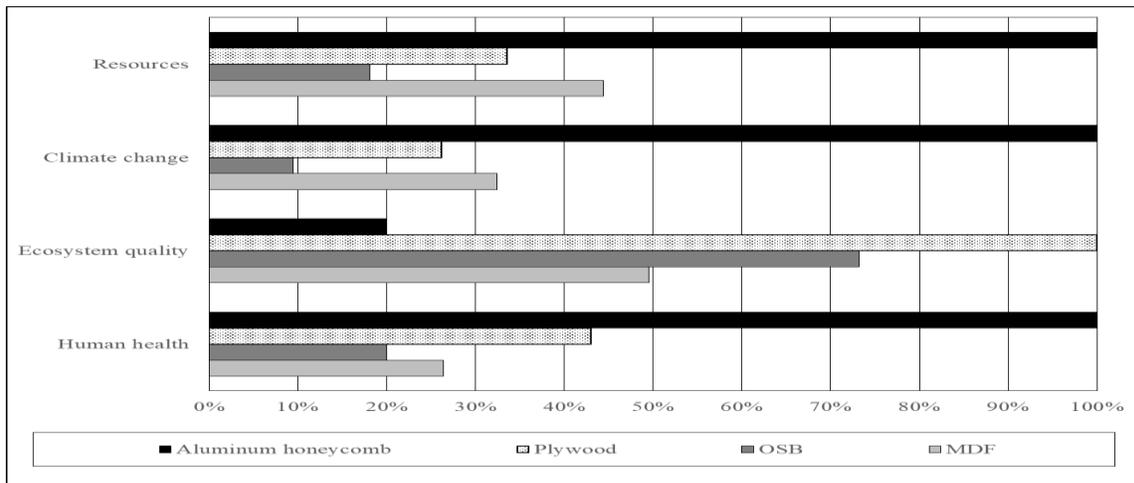


Figure 5.4: Comparison of wood-based composites manufacturing and aluminum honeycomb manufacturing by damage category.

The impact of MDF, OSB and plywood manufacturing represented 30%, 20%, 44% of negative impact respectively of aluminum honeycomb manufacturing in human health category; 36%, 10%, 28% in climate change category; and 47%, 18%, 35% in resources category. The OSB showed a smaller negative impact in human health, climate change

and resources categories, while aluminum honeycomb manufacturing showed a smaller negative impact in the ecosystem quality category.

5.8.2. Analysis of manufacturing process of WAL panels and AHP

Table 5.4 shows the environmental impact of manufacturing process of WAL panels and AHP by damage categories (cradle-to-gate). The analyses showed that OSB aluminum-laminated panel manufacturing presented the best environmental performance in human health, climate change and resource categories. In contrast, the AHP manufacturing presented greater negative impact in these three categories. The impacts in human health category of OSB, MDF and plywood aluminum-laminated panels manufacturing represented 69%, 71% and 77% respectively, compared to aluminum honeycomb panel manufacturing. In climate change category, the impact associated with OSB, MDF and plywood aluminum-laminated panels manufacturing represented 66%, 74% and 72% compared to aluminum honeycomb panel manufacturing, while in resources category represented 65%, 74% and 71%. Finally, in ecosystem quality category, the impacts associated with aluminum honeycomb panel manufacturing represented 44% compared to plywood aluminum-laminated panel manufacturing. The impacts associated with OSB and MDF aluminum-laminated panel manufacturing represented 81% and 64% respectively.

Table 5.4: IMPACT 2002+ end-point results: Comparison of WAL panels and AHP.

Category	LAMINATED PANELS			
	MDF aluminum-laminated panel	OSB aluminum-laminated panel	Plywood aluminum-laminated panel	Aluminum Honeycomb panel
Human Health (DALY)	4.78E -05	4.62E -05	5.18E -05	6.65E -05
Ecosystem quality (PDF*m ² *yr)	10.40E +00	13.10E +00	16.20E +00	7.13E +00
Climate change (kg CO ₂ eq)	31.20E +00	27.90E +00	30.30E +00	41.50E +00
Resources (MJ primary)	4.81E +02	4.24E +02	4.58E +02	6.29E +02

Fig. 5.5 shows the results of contribution analysis in each damage categories. The emissions associated with aluminum alloy sheets manufacturing were the main contributor to the environmental impact in human health, climate change and resources categories. However, the emissions associated with wood-based composite manufacturing was the highest contributor to ecosystem quality category.

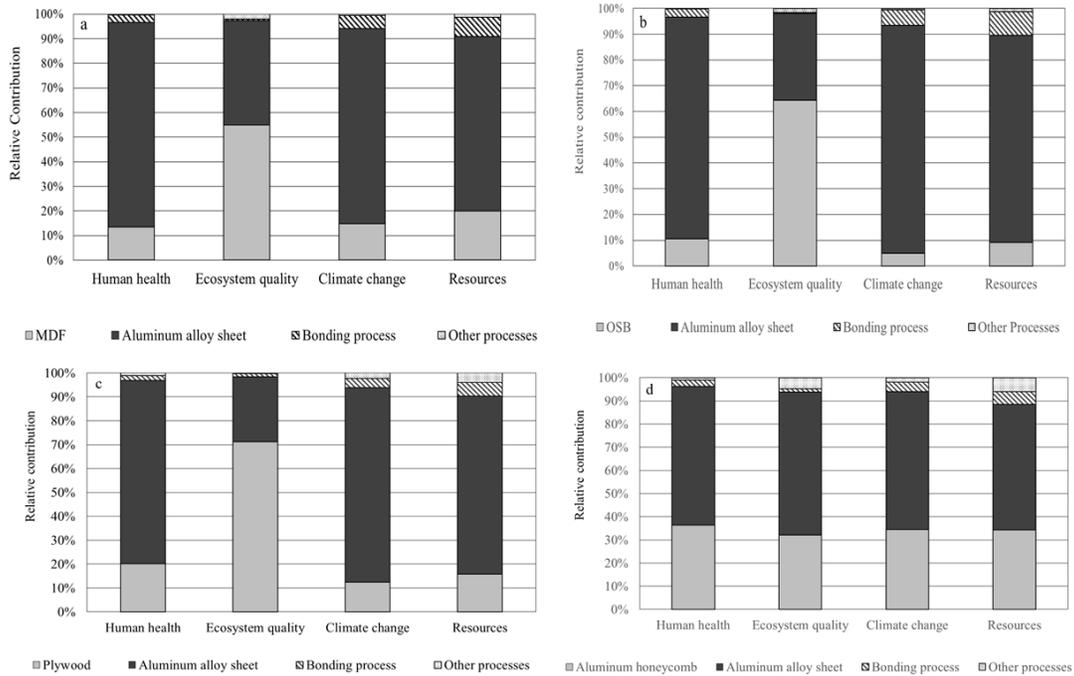


Figure 5.5: Relative contribution at endpoint categories (in %) of each manufacturing process of WAL panels and AHP. a: MDF aluminum-laminated panel; b: OSB aluminum-laminated panel; c: Plywood aluminum-laminated panel; d: Aluminum honeycomb panel.

On the one hand, the contribution analysis of laminated panels in the climate change category showed that the greenhouse gas emissions as CO, CO₂, CH₄ and SF₆ from aluminum alloy sheets manufacturing represented more than 79% of the total negative impact for WAL panels. On the other hand, the greenhouse gas emissions by aluminum honeycomb manufacturing and aluminum alloy sheet manufacturing represented 94% of the negative impact total. CO₂ involves the highest emissions contribution in WAL panels and AHP manufacturing (Table 5.5). The CO₂ is emitted from aluminum alloy sheet manufacturing mainly by aluminum primary liquid production and heat production. The

emissions of CO₂ in wood-based composites manufacturing were mainly originating from adhesive production (2.85kg/MDF, 0.736kg/OSB and 2.801kg/Plywood).

Table 5.5: Emission of CO₂ in kg (WAL panels and AHP). IMPACT 2002+ method.

Materials/Processes	CO ₂ emissions in kg by laminated panels			
	MDF aluminum-laminated panel	OSB aluminum-laminated panel	Plywood aluminum-laminated panel	Aluminum Honeycomb panel
Core manufacturing	4.46	1.25	3.55	13.30
Aluminum alloy sheet manufacturing	22.90	22.90	22.90	22.90
Bonding process	1.05	1.05	1.05	1.59
Other processes	2.16	2.10	2.10	0.61
Total	30.60	27.30	29.60	38.40

The contribution analysis in the human health category showed that emissions associated with aluminum alloy sheet manufacturing represented 83%, 88%, 81% and 60% of total negative impact for the MDF aluminum-laminated panel, OSB aluminum-laminated panel, plywood aluminum-laminated panel and AHP, respectively. While, the emissions associated with wood-based composites manufacturing represented 14%, 9%, and 20% of total negative impact for three WAL panels. The contribution analysis in the resources category showed that emissions associated with aluminum alloy sheet manufacturing was main contributor of total negative impact. Aluminium alloy sheets manufacturing represented 72%, 83% and 76% of total negative impact for MDF aluminum-laminated panel, OSB aluminum-laminated panel and plywood aluminum-laminated panel, respectively. While for AHP manufacturing represented 54% of total negative impact.

In ecosystem quality category, the emissions associated with wood-based composites were the main contributor of negative impact for WAL panels. The impact are specially generated in the treatment of wood ash mixture process and wood production process. For AHP manufacturing, the emissions associated with aluminum production specially with

bauxite mine operation and aluminum primary production. The results have shown that the use of wood-based composites as core in laminated panels has an advantage compared to the aluminum honeycomb. Although, the emissions associated with the consumption of resins as UF, MUF and PF in wood-based composites manufacturing are an important constraint at the environmental level. Therefore, the use of resin from renewable sources could improve the environmental profile of these composites and the WAL panels (Silva et al., 2015). The results shows also that emissions of aluminum alloy sheets manufacturing were the main contributor to environmental impact laminated panels. Consequently, replacing aluminum primary by recycled aluminum could also improve the environmental profile of laminated panels, mainly due to decrease in electricity consumption (Aluminum association 2013; Zhang et al., 2016). The results of analyses considering recycled aluminum are presented below.

The emissions associated with bonding process, which includes adhesive production (polyurethane or epoxy resin) and electricity process was the third contributor to the negative impact of aluminated panels. The consumption of adhesive was higher in AHP (0.200kg/m²) in comparison with WAL panels (0.130kg/m²), resulting in a higher negative impact in all damage categories, except in ecosystem quality (Table 5.6).

Table 5.6: IMPACT 2002+ end-point results: Comparison of consumption of epoxy resin and polyurethane adhesive.

Category	Adhesive production			
	Epoxy Resin	Main substances	Polyurethane Adhesive	Main substances
Human Health (DALY)	9.21E -7	NOx, SO ₂	4.86E -7	NOx, Particules<2.5um
Ecosystem quality (PDF*m ² *yr)	0.0435	NOx, Zinc	0.0185	NOx, Zinc
Climate change (kg CO ₂ eq)	0.84	CO ₂ , CH ₄	0.573	CO ₂ , CH ₄
Resources (MJ primary)	17.4	Gas natural	12.8	Gas natural

The other production steps such as sanding, pressing and degreasing do not contribute significantly to total negative impact in all damage categories. In all cases, the contribution

of all these other processes was less than 6% of total negative impact. The environmental assessment of this study was limited to the laminated panels manufacturing process, in order to complete the study, the analysis of the use phase in a more defined context and end of life phase should be carried out, which could imply a variation in the impact results.

5.8.3. Sensitivity analysis

Alternative scenario: Use of recycled aluminium for the manufacture of aluminum alloy sheet. The aluminum alloy sheets manufacturing using recycled aluminum showed a dramatic decrease of the total negative impact. In the case of aluminium honeycomb panel manufacturing, the negative impact was nearly halved in all damage categories with the exception of ecosystem quality category. The reduction of total negative impact on this category was only 9%. In the case of WAL panels manufacturing, the reduction of negative impact was also important in all damage categories except for ecosystem quality.

The reduction of negative impact in the climate change category was between 74 and 65%, in the human health category was between 77% and 67%, while in the resources category was between 69% and 60% for three WAL panels. The main contributor to the negative impacts on ecosystem quality category was the wood-based composite manufacturing process. Therefore, the reduction of negative impact in this category was only 17%, 21% and 9% for MDF aluminum-laminated panel, OSB aluminum-laminated panel and plywood aluminum-laminated panel, respectively. The comparison between laminated panels was conducted with TRACI method, to test if this influences the results, at the same time, to verify the robustness of the results obtained from IMPACT2002+ method. Fig 5.6 shows the results of both methods.

The analysis at mid-point categories demonstrated that the generated results showed similar trends in aquatic acidification and global warming categories. For respiratory inorganic category, LCA result using TRACI method was less than IMPACT2002+. In contrast, for ozone layer depletion and mineral extraction categories, the LCA result using the IMPACT2002+ method was less than the result obtained using the TRACI method.

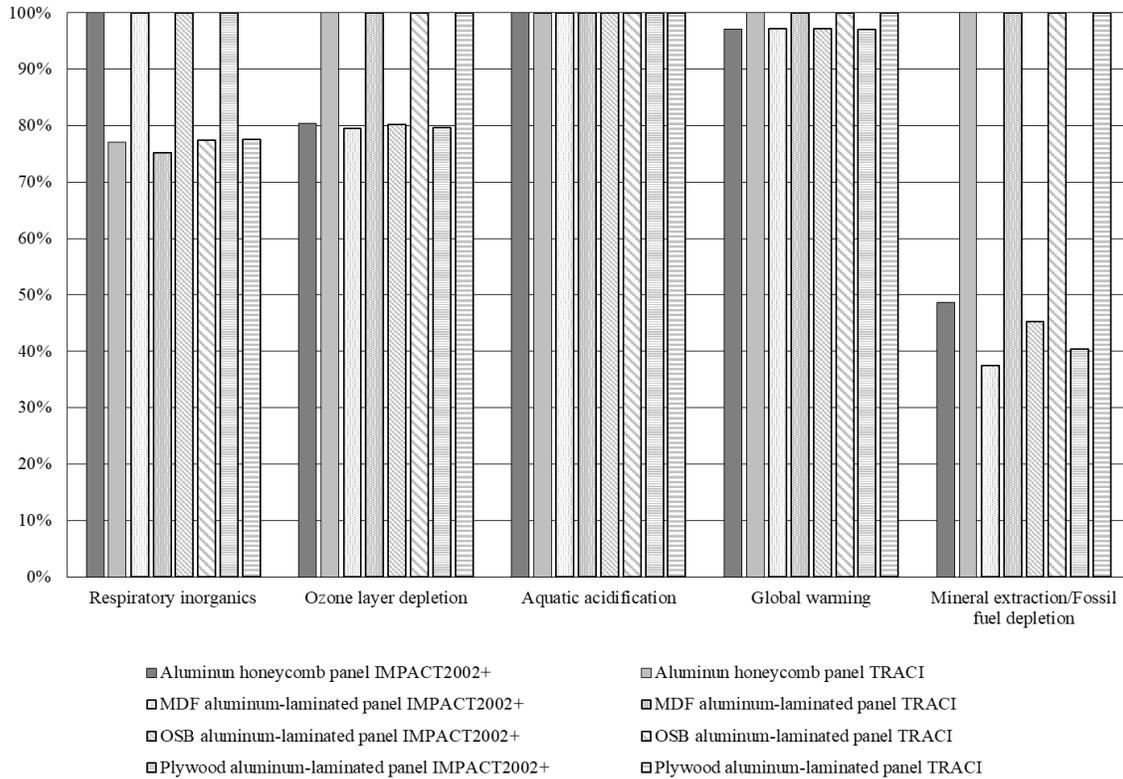


Figure 5.6: Sensitivity analysis results: impact category according to IMPACT 2002+ method compared to TRACI method

5.9. Conclusion

A comparative LCA study of the manufacturing of three WAL panels with different types of cores and an AHP was performed. The functional unit was defined as laminated panel manufacturing of one square metre per 10 mm of thickness able to withstand a load of 6.0 kgf/mm², as an interior floor. The LCA study identified the contribution of each material at environmental impacts throughout the laminated panels manufacturing. The main conclusions of LCA study in the product development process of laminated panels are as follows.

In term of product, the comparison of WAL panels and AHP allowed identify that wood-based composites are the best choice as core in laminated panels manufacturing. Among panel component considered in this LCA study, OSB manufacturing had the lowest impact on the human health, climate change and resources categories of all the wood composites.

On the other hand, MDF manufacturing had the lowest impact on ecosystem quality category. Furthermore, polyurethane adhesive is the best option compared to epoxy resin. Polyurethane adhesive had the lowest impact on all damage categories, except on ecosystem quality category. Finally, the utilisation of aluminum alloy sheets is the main contributor to negative impact in each laminated panel.

For the final product, the results indicate that WAL panels presented lowest negative impact than AHP on climate change, human health and resources categories, while AHP manufacturing presented lowest negative impact on ecosystem quality category. The environmental advantages of the WAL panels can be due to the reduction of primary aluminum quantity and/or the selection of wood-based composite compared to AHP. LCA results also show the environmental benefits of the selection of wood-based composites as core. Although, analyse of use and end of life phases could modify the results. The emissions associated with aluminum primary in aluminum honeycomb manufacturing were most contribute to negative environmental impacts.

Contribution analysis results showed that emissions related to aluminum alloy sheets manufacturing were the main cause of the negative impact for each laminated panel. For each WAL panel manufacturing, these emissions contributed between 71% and 88% of total negative impact on human health, climate change and resources categories. The emissions associated with wood-based composites were between 5% and 20% of total negative impact on human health, climate change and resources categories. In contrast, for the ecosystem quality category were between 55% and 72%. The negative impact of wood-based composites manufacturing was mainly due to adhesive production process emissions. Therefore, the selection of a resin from renewable sources in the manufacturing of wood-based composite could decrease the environmental burden. Likewise, the utilisation of recycled aluminum as material for aluminum alloy sheets manufacturing resulted in a significant improvement in the environmental impacts of laminated panels, being an alternative in the development process of WAL panels.

The study demonstrated the usefulness of LCA methodology in the decision-making in development process of WAL panels. WAL panels manufacturing is a better

environmental option compared to AHP manufacturing. Therefore, WAL panel could replace AHP where material weight is not critical, considering, that the first is heavier, but both have comparable mechanical properties. In conclusion, WAL panels should be considered as a serious alternative to AHP.

Chapitre 6 Potential applications of wood aluminum-laminated panels: Using a grounded theory approach

6.1. Résumé

Cet article se concentre sur la détermination des applications potentielles pour les matériaux composites à base de bois laminés avec alliage d'aluminium développés en laboratoire. La méthodologie de recherche qualitative basée sur la théorie ancrée est utilisée à cette fin. Des entretiens semi-structurés avec des questions ouvertes ont été menés pour recueillir des données textuelles qualitatives. Les personnes interviewées sont des producteurs de produits structuraux et non structurels pour les secteurs de la construction et des transports, ainsi que des concepteurs de produits. Le codage des données textuelles suggère des applications potentielles pour les matériaux développés dans différentes catégories, telles que les matériaux de structure, les matériaux de construction, les meubles, les panneaux et le transport. Trois principales applications potentielles ont été suggérées par les personnes interviewées : planchers surélevés ; panneau pour séparations de salle de bain ; et panneaux contreventement et décoratifs. Les personnes interviewées ont fait différentes suggestions pour améliorer les matériaux composites développés telles que l'optimisation de l'épaisseur, la résistance à l'humidité, le matériau de base et le traitement de surface, entre autres. Enfin, les applications suggérées devraient être validées par des essais techniques pour chaque finalité d'application.

6.2. Abstract

This article explores potential applications for a wood aluminum-laminated panels developed in laboratory. The grounded theory methodology of qualitative research is used for this purpose. Semi-structured interviews with open-ended questions are used to gather qualitative textual data. The interviewees are producers of structural and non-structural products for construction and transportation sectors, as well as product designers. The coding of the textual data suggests potential applications for the wood aluminum-laminated panels in different categories such as structural materials, building materials, furniture, panels, and transport. Three potential applications were suggested raised flooring; bathroom dividers; and bracing and decorative panels. The interviewees also make suggestions to improve wood-aluminum panels such as thickness optimization, moisture resistance, core material, and surface treatment, among others. Finally, the applications suggested should be validated through standards tests for each final applications.

6.3. Introduction

Wood aluminum-laminated (WAL) panels are developed in laboratory. WAL panels present excellent physical and mechanical properties (thickness swelling, linear expansion, apparent modulus of elasticity and modulus of rupture). The properties of wood-based composite are significantly improved by lamination with aluminum alloy sheets (Segovia et al. 2015). The development of WAL panels implies the assessment and comparison of environmental impacts associated with its manufacturing. WAL panels show environmental advantages compared to aluminum honeycomb panels, due mainly to reduced emissions associated with wood-based composites (Segovia et al. 2017). Initially, the WAL panels were developed for a final application as substrate for engineered wood flooring. The high physical and mechanical properties and the estimated costs expand considerably final application opportunities. The present paper identifies the main potential applications of WAL panels, through a qualitative research study.

Qualitative research does not seek to quantify or measure, but rather to analyze non-numerical or verbal information (words, actions, postures, ideas, beliefs, etc.), to explore and understand complex human phenomena. This type of research at the beginning does not have a clear hypothesis of the destination of the study. The concepts and hypotheses are formulated throughout the research itself (Hernández 2014). Researchers focus on experiences and data in their natural environment so that there may be a space for expressing the peculiarities of the same (Flick 2011). The qualitative research process is composed of five interconnected phases: the researcher; the paradigms on which he supports his study; research strategies; methods of collecting and analyzing empirical material; and interpretation (Denzin and Lincoln 2012).

There are several methodologies in qualitative research. One of them is the grounded theory approach of Glaser and Strauss (1967). Grounded theory approach is a systematic yet flexible methodology, designed to assist with the development of substantive, explanatory models grounded in relevant empirical data (Hutchison et al., 2010). The grounded theory uses the inductive analysis of the quantitative data to build a determined theory on the object of study (Charmaz 2015). Grounded theory approach is built upon

two key concepts: constant comparison and theoretical sampling (Glaser and Strauss 1967).

Glaser and Strauss (1967) incorporate the criterion of theoretical saturation, which determines when the sampling must stop due to no new data produced. Researchers should be clear in explaining how to achieve saturation and what problems are encountered in recruiting participants (O'Reilly and Parker, 2012). The saturation of the sample is determined by the suitability of the data and not in the number of participants. Mason (2010) exposes different criteria for achieving saturation as the heterogeneity of the population; the number of selection criteria; groups of special interest that require intensive study; multiple samples within one study; types of data collection methods used; the budget and resources available; the scope of the study; the nature of the topic; and the quality of the data.

This research aims to identify the potential applications of WAL panels based on the information obtained through qualitative research. Analysis methodology is based on the grounded theory. Semi-structured interview technique with open-ended questions will be used to gather qualitative textual data. The participants to the interviews are producers of structural and non-structural products from construction and transportation sectors, and product designers based in the province of Quebec, Canada.

6.4. Background

A laminated panel consists of two thin face sheets made from stiff and strong relatively dense material, like metal for example, bonded to a thick lightweight material called core (Carlsson and Kardomateas 2011). Laminated panels offer high bending stiffness and high strength-to-weight ratios, which are achieved when the face and core interact in an optimal way (Belouettar et al. 2009). The WAL panels with three different cores were produced in laboratory. Medium-density fiberboard (MDF), oriented strand board (OSB) and plywood were used as cores. The core panels (wood-based composites) are laminated with two aluminum alloy sheets (Segovia et al., 2015). The WAL panels present similar physical and mechanical properties, except for thickness swelling (Fig. 6.1). The WAL panels show excellent dimensional stability, except for MDF-core. These also exhibited

significantly greater elasticity modulus and module of rupture values in comparison with wood-based composites without lamination (Segovia et al., 2015). The determination of the physical and mechanical properties are of relevance when proposing a future application for a new developed material. The properties confirm that WAL panels have the potential to be used as structural panels in future applications.

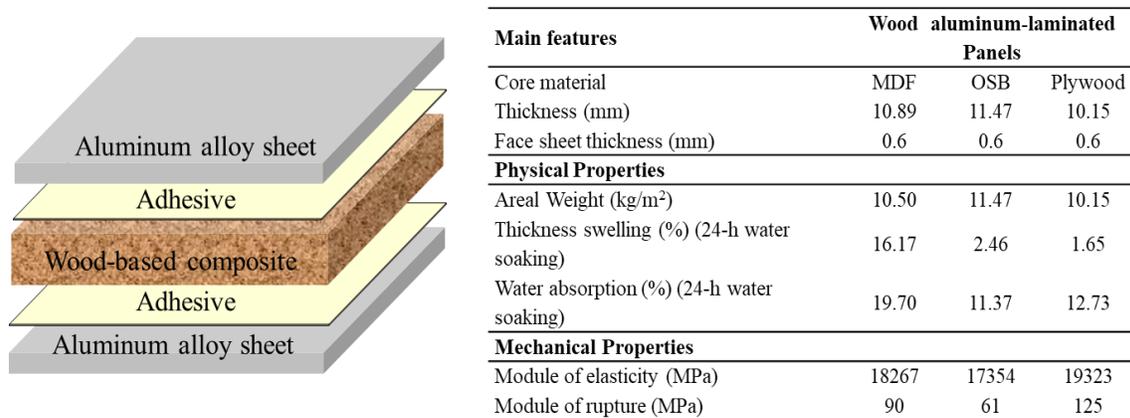


Figure 6.1: Typical layout and physical and mechanical properties of wood aluminum-laminated panels.

The estimated manufacturing costs of WAL panels are carried out based on the technical cost modelling approach of Wakeman and Manson 2004. This analysis shows that aluminum alloy sheet represents approximately 44% of the total estimated cost, while wood-based composites represent between 6% and 9% of estimated cost varying with the wood-based composite used as core (Segovia et al., 2015).

The environmental performance analysis of WAL panels have been carried out according to the Life Cycle Assessment (LCA) framework of (ISO 2006a) and (ISO 2006b). This LCA study has been modelled using SimaPro 8.4 software with database support from Ecoinvent v3.0 (Ecoinvent center, 2015). The analysis is delimited by cradle-to-gate system boundaries. Consequently, raw material extraction, manufacturing of components (wood-based composite, aluminum alloy sheet and adhesive), and manufacturing of laminated panels are included in the modelling. The system boundaries for both products are shown in Fig. 6.2.

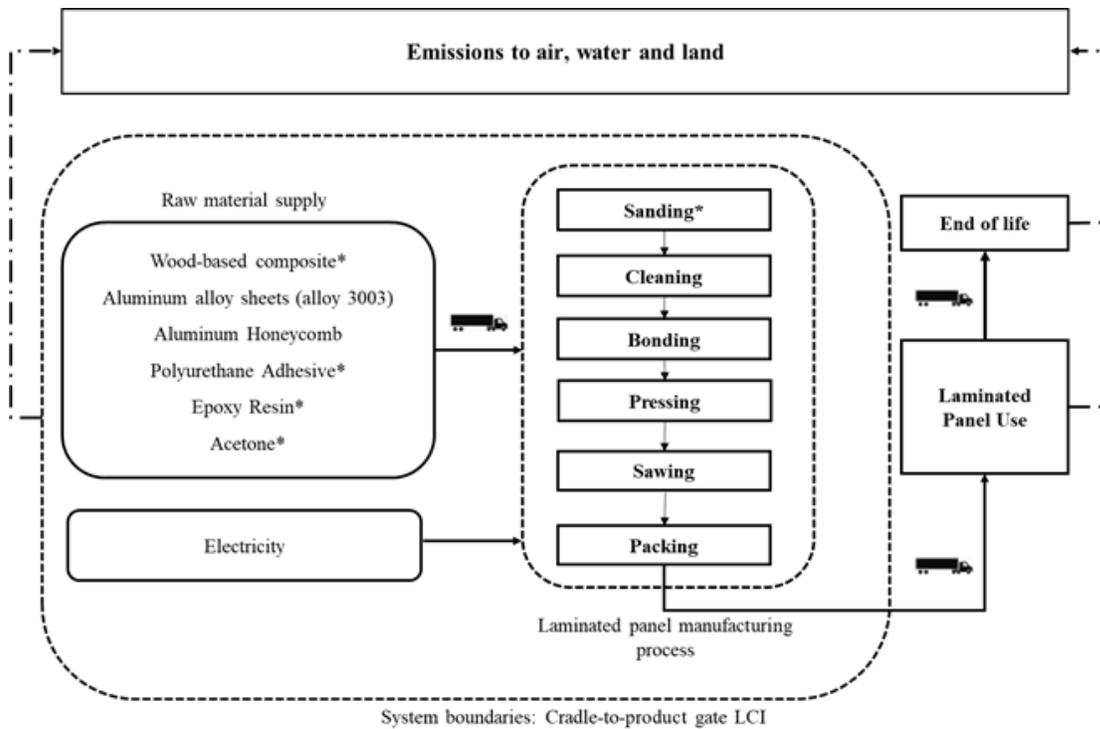


Figure 6.2: Cradle-to-gate life cycle boundaries of wood aluminum-laminated panels and aluminum honeycomb panel, *WAL panels manufacturing.

According to LCA study, WAL panels show environmental advantages in comparison to aluminum honeycomb panel (table 6.1). The emission activities related to aluminum alloy sheets manufacturing are the main cause of the negative impact in WAL panels manufacturing (Segovia et al., 2017). For each WAL panel manufacturing, these emissions contribute to, between 88% and 71% of total negative impact in human health, climate change and resources categories. The LCA results also show that the emissions associated with wood-based composites manufacturing were between 5% and 20% of total negative impact in human health, climate change and resources categories. For ecosystem quality category, emissions associated with MDF, OSB and plywood manufacturing represented 55%, 64% and 71% of total negative impact, respectively. The comparison of WAL panels and AHP allowed identify that wood-based composites are the best choice as core in laminated panels manufacturing. WAL panels manufacturing is a better environmental option (Segovia et al., 2017).

Table 6.1: Comparison of environmental impacts for WAL panels and AHP. Using IMPACT2002+ method.

Category	LAMINATED PANELS			
	MDF aluminum-laminated panel	OSB aluminum-laminated panel	Plywood aluminum-laminated panel	Aluminum Honeycomb panel
Human Health (DALY)	4.78E -05	4.62E -05	5.18E -05	6.65E -05
Ecosystem quality (PDF*m ² *yr)	10.40E +00	13.10E +00	16.20E +00	7.13E +00
Climate change (kg CO ₂ eq)	31.20E +00	27.90E +00	30.30E +00	41.50E +00
Resources (MJ primary)	4.81E +02	4.24E +02	4.58E +02	6.29E +02

6.5. Methodology

The study considers the use of qualitative research based on the methodology of grounded theory of Glaser and Strauss (1967). The methodology allows an interpretation, assessment and analysis of the non-numerical information. The type of sampling is called theoretical sampling. The structure of the sample is performed gradually throughout the research process; the theoretical sampling is based on the relevance of the cases and not according to criteria of representativeness. In qualitative research, the sample size is measured by the depth of the data rather than the frequencies. Therefore, the samples must be composed of the participants that best represent the research subject (O’Reilly and Parker 2012). The theoretical sampling is not based on the criteria of statistical sampling (random sampling or stratified). Therefore, the individuals are selected considering the expectations that generate the contribution of new ideas (Flick 2012). Under this criterion, there are infinite possibilities of incorporating new individuals into the sample. Therefore, it is important to define criteria for limiting the sample.

The coding process of qualitative data allows identifying of categories, which can be further divided into subcategories and grouped into common categories. In qualitative research transparency, it is recognized as a sign of quality. Therefore, it is important to include details about data collection (O’Reilly and Parker 2012). In grounded theory, coding processes are closely linked to theoretical sampling. There are three types of coding: open, axial and selective (Strauss and Corbin 1990). The open coding analyzes line-by-line or word-by-word the data for the purpose of developing provisional concepts.

Axial coding is defined by Strauss and Corbin (1990) as a set of procedures whereby data are put back together in new ways after open coding, by connections between categories. The analysis focuses specifically on emerging categories. According to Strauss and Corbin (1990), the selective coding occurs toward the end of the grounded analysis as a process of selecting the core category, which is connected systematically with other categories. Finally, selective coding is the examination of data for the purpose of developing the main category and achieving the integration of the theoretical framework (Strauss 1987).

6.5.1. Interviewees

The population or target audience for the study are producers of structural and non-structural products from construction and transportation sectors, and product designers based in Québec, Canada. Sampling for the study is conducted using the non-probabilistic method. Three of Patton's strategies are taken into account from the selection of participants: criterion sampling, convenience sampling, and snowball sampling (Patton 1990).

In order to gain a holistic understanding, certain criteria are taken into account. The criteria used for the inclusion of participants in the study (criterion sampling) are: the knowledge of composite materials (wood-based composite or/and laminated panel); the experience in the construction industry or transport or in products development; the influence on the development of products; living in Québec. These criteria can ensure to have clear and more precise information in accordance with the research objectives. The participants in the study are volunteers only. The participants are recruited by telephone call or by e-mail. The interviewees established the location, date, and time of the interviews. Most interviews were conducted at the job location of the participants. A few were conducted at the Université Laval. The interviews were conducted in French. The size of the sampling was defined based on the saturation criterion of the grounded theory (Glaser and Strauss 1967).

6.5.2. Conducting interviews

The semi-structured interview technique (open-ended question) is chosen to achieve the research objectives. A semi-structured interview has predetermined questions, but the order can be modified based upon the interviewer's perception of what seems most appropriate (Jantunen and Gause 2014). The information produced by the initial procedure included interview transcripts of participants recruited according with the selection criteria.

The questions of semi-structured interview are grouped into two parts. The first part of the interview is about general information of the participants such as vocational training, and work experience. In this section, we also ask questions about company products and the degree of influence of participants in product development processes. Before starting the second part of the interview, WAL panel specimens (laminated panels) and explanations of the physical and mechanical properties of WAL panel specimens are presented to the participants. The interviews provided the necessary time to explain and clarify the results of physical and mechanical properties of the WAL panel specimens. The second part of the interview is about collecting information and opinions on the advantages and disadvantages of WAL panels in selected applications; the characteristics considered in the development of a composite material; the potential applications for each WAL panel (sandwich structure presented); and the use of WAL panels by enterprises. The questions in this part of the interviews also included the economic and environmental aspects of WAL panels.

6.5.3. Data analysis

First, the content of each interview is transcribed in word format. The phase of coding starts with the identification of relevant data and grouping them into categories (open coding) using Nvivo11 software from QRS international. Next, an axial coding is carried out, which consisted on the search of relationships between these categories. This phase includes the reorganization of the material or data into categories or sub-categories. Finally, the last phase consists in the interpretation of the results. The Multi-Sectoral

Research Ethics Committee of the *Université Laval* (CERUL 2015-045/10-04-2015) approved this research project.

6.6. Results and discussion

In this section, the results obtained from interviews are presented. The main potential applications for WAL panels are identified. The results include information processing, which is aggregated in five sections: interviewee's characteristics, advantages and disadvantages, technical considerations, economic and environmental considerations and potential applications.

Interviewee's characteristics: Eleven companies or organizations are represented in the interviews carried out (n=11). Two companies are dedicated to the design and manufacturing of furniture and panels for furniture. Two companies are from the transport sector, mainly coach manufacturing and laminated hardwood floors for trailers. Two companies are from the construction sector (building construction). Two companies are dedicated to the doors and windows manufacturing. Finally, three companies or organizations are dedicated to the design and technical assistance in building construction.

Almost the 100% of interviewees have university studies. Mainly, in physical and forest engineering, in product development, in architecture and design. The results indicate that eight of interviewees are highly involved in the product development process. Two interviewees are highly involved in the product selection process for building construction. One interviewee is indirectly involved in the product development process. The professional experience of the interviewees assure to achieve the study objectives. The interviewees presented extensive professional experience in different fields related to the objectives of the study (table 6.2). The interviewees have experience in project management, product development process, construction systems, structural design, eco-design, technical standards, marketing, among others.

The interviews process presented certain difficulty as the time available for the interviewees. In our opinion, the saturation was achieved when the target audience for study was covered, in other words, the representatives of the different sectors were

interviewed. The coding of the categories of WAL panels applications potential was also a saturation criterion.

Table 6.2: Characteristics of interviewees

Position	Experience year	Sector	Degree of involvement
Innovations Director	18	Furniture and furniture panels	H
General Director	10	Construction building	H
General Manager	13	Construction building	H
Project Manager	7	Construction building	H
Research and Development Director	13	Doors and windows	H
Gouvernement Relations Manager	30	Doors and windows	H
General Manager	8	Construction building	H
General Manager	10	Furniture panels	H
General Manager	23	Transport	H
Project Manager	12	Transport	H
Professor	20	Design	M

H: Highly; M: Moderately

Considerations in the development of products: Table 6.3 shows the main considerations for the development process of WAL panels according to interviewees' opinions. Interviews results suggest several technical considerations in the product development process. Some of these considerations are linked to avoid cost overrun in the manufacturing process. This statement does not imply that any product is discarded if it generates cost overruns. There are other considerations such as potential customers willing to pay higher price to buy a product with a particular appearance or better. Considerations related to product manufacturing are also mentioned by the interviewees such as product adaptation to the production line and additional labor in product installation. These characteristics are important to avoid cost overruns.

The product final application is one of the most important consideration according to the interviewees. This final application defines the physical and mechanical properties needed from a product. Likewise, these properties should be in accordance with the technical standards.

Table 6.3: Main considerations in the WAL panel development process according to interviewees

Considerations	Detail
<i>Technical</i>	
Dimensions	Large dimensions are recommended from the architectural point of view (Design)
Weight	Important to avoid deformation and for systems against earthquakes
Humidity Resistance	Deformation resistance due to changes in moisture and weight (warping)
Fire Resistance	Important consideration for door panels (fire-resistant test)
Delamination	Because of temperature change
Mechanical properties	Properties are very important for aeronautical, aerospace applications
<i>Processing</i>	
Adaptable Materials	The new material can be machined without changing the production line
Installation	Products of easy installation. It does not require additional labor on site.
<i>Others</i>	
Applications	The properties are fixed according to the final application
Cost and price	Avoid cost overrun in manufacturing products
Conformity with norms	The product should be able to withstand industry-specific standard testing
Potential Customers	Convince customers of the advantages of the product (marketing)
Appearance	Important by the price and customer preferences

Advantages and disadvantages of WAL panels: This part shows the main advantages and disadvantages of physical and mechanical properties of WAL panels according to interviewees' opinions. In accordance with the coding performed, the main advantages and disadvantages can be grouped in the following categories:

Modulus of elasticity: The modulus of elasticity is the most prominent property of the WAL panels. This property increases the possibility of use products with greater dimensions, and to avoid future deformations. Structurally, a greater modulus of elasticity allows the use of less material and consequently reduce costs, for the same mechanical performance.

Modulus of rupture: The WAL panels present high modulus of rupture. Although, in accordance with interviewees, this property is not important for several potential applications.

Surface: The metal finish on the surface is interesting for designers. This is an important advantage for the marketing of WAL panels. The surface of aluminum alloy allows the application of several treatment such as painting.

Low weight: It is an advantage in comparison with other materials with similar mechanical properties.

Core: The mechanical properties with different wood-based composites are comparable. Therefore, the price of cores plays an important role in WAL panels. MDF aluminum-laminated panel shows a price level advantage.

Among the main disadvantages encountered are:

Processing: The WAL panels are difficult to machine due to the aluminum alloy. Cutting tool wear is likely to be high. The adaptation of the production line due to the presence of alloy aluminum sheets generates cost overruns.

Water infiltration: A disadvantage important of the WAL panels is the possible water infiltration, mainly, for WAL panel with MDF as core. This would have an impact on the mechanical properties. There are previous experiences with laminated panels on transport sector, which presented problems due to the water infiltration.

Fire resistance: Aluminum alloy sheets can be a disadvantage due to poor fire resistance. For different applications, the WAL panels should be tested for fire resistance.

Humidity Resistance: The humidity resistance of WAL panels could be a limitation. The WAL panels can lose the physical and mechanical properties by moisture change, mainly for WAL panel with MDF as core.

Economic and environmental considerations: The analysis of interview results shows the importance of environmental aspects for the interviewees in the development product

process. In comparison to ten years ago, environmental demands on products have increased considerably. Therefore, the environmental certification is considered an environmental advantage.

For some interviewees, the main advantage of WAL panels is that the use of alloy aluminum sheets increases the recycling capacity of this material. The aluminum can be recycled continuously without losing its mechanical properties. On the other hand, other interviewees indicated, that the use of alloy aluminum sheets in WAL panels is a disadvantage in comparison with a wood panel. The WAL panels manufacturing with aluminum alloy sheets requires a lot of energy compared with a wooden panel.

According to the interviews results, the utilization of wood-based composite as core in WAL panels is another advantage because it shows a major environmental performance in comparison with aluminum honeycomb. In contrast, the use of adhesive in wood-based composites manufacturing is considered as an environmental disadvantage by the interviewees. Although, the use of polyurethane adhesive for certain interviewees is an advantage because it avoids the emission of formaldehyde.

Another disadvantage in the environmental aspect of the WAL panels is the bonding of aluminum alloy sheets with wood-based composite. This suggests the realization of stages prior to the recycling of both materials, which is not the case with High Pressure Decorative Laminate (HPDL) panels. HPDL panels can be recycled directly.

The importance of the economic aspects were also highlighted by the interviewees. Among the main economic aspects indicated by the interviewees are: price; manufacturing cost; target market; and competitive products.

The price customers are willing to pay is very sensitive. However, it should be easy to demonstrate the advantages of the material in its use, maintenance and energy savings. The material can be much more expensive but the use on site is faster. One of the concerns expressed by the interviewees is the price of aluminum. There are different ways of making WAL panels more attractive such as surface treatment or special aesthetics, but the price always have to be consider to stay competitive.

WAL panels potential application: This part shows the results of potential applications of the WAL panels. Table 6.4 presents main potential applications proposed by the interviewees and are grouped in five categories (structural materials; building materials; furniture; panels; and transport). Among the main potential applications suggested in building materials category is raised flooring. Raised flooring system is widely used in modern office buildings and in specialized areas such as command centers. This system provides an elevated structural floor to create a hidden void for the passage of mechanical and electrical services. The characteristics of WAL panels such as load-bearing capacity (5.8kN) could confirm that these panels could be used in raised flooring systems. Other suggested potential application in replacing glass by WAL panels as a material for the door manufacturing, although this would imply an increase in the price. Another concern regarding this potential application is the use of a panel with metallic finish which is less expensive.

In the furniture category, the bathroom dividers subcategory was more often suggested due mainly to aluminum alloy sheets as face. According to interviewees, these WAL panels present interesting features such as resistance, aesthetic, and easy cleaning. Also, these panels can probably bear screwing inside to hold the accessories of toilets, doors, (with the addition of small inserts). Another subcategory suggested was industrial counters mainly because aluminum is already used, but the wood core can reduce the manufacturing costs.

The panel category shows six subcategories such as bracing, decorative, exterior, wall, insert, and ceiling panel. Bracing and decorative panel categories are the most suggested for interviewees. WAL panels could be used in structures that need a major shear resistance. There are constructions where are installed two OSB panels for have more shear resistance, WAL panels could replaced OSB panels. The OSB aluminum-laminated panel shows an edgewise shear strength value of 45% (11.51 MPa) highest that OSB without lamination (7.96 MPa) (Segovia et al., 2015).

In the transport category, WAL panels could be used in the aeronautic or aerospace sector according to certain interviewees, while for other interviewees, the quality requirements

in these sectors are very high. For rail and automotive sector, WAL panels showed the greatest opportunity to replace products used in this sector, although, it is important to improve the moisture resistance. There are previous experiences in the use of aluminum/plywood materials as rear doors of semi-trailers, for example, where the main problem has been the moisture resistance of the product.

Table 6.4: Main potential applications of WAL panels from interviewees

Potential applications of WAL panels		
<i>Category</i>	<i>Subcategory</i>	<i>Frequency</i>
Structural Materials	Reinforcement of wood beams	1
	Beam elements	1
Building Materials	Walking stairs	1
	Raised flooring	2
	Doors	3
	Window frames	1
Furniture	Office furniture	1
	Bathroom dividers	2
	Counters	1
	Industrial counters	2
	Drawer bottom	1
Panels	Bracing panel	2
	Decorative panel	2
	Exterior panel	1
	Wall panelling	1
	Insert panel	1
	Ceiling panel	1
Transport	Rail / Automotive	2
	maritime	3
	Aeronautic /Aerospace	2

Improvement of WAL panels: Interviewees proposed improvements of WAL panels such as dimensions thickness, core type, humidity resistance and surface treatment among others.

The optimization of the thickness was one of the categories suggested by the interviewees for the improvement of the panels. This would lead to an improvement in the combination of their physical and mechanical properties. The optimization of the thickness is important for different applications where the material is required to comply with fire-resistance

tests. Another category suggested associated with thickness optimization category was the type of core used in the WAL panels. Certain interviewees suggest the use of wood or cardboard honeycomb as corer to create lightweight panel. For the transport sector, hydrophobic capacity of wood (core) is an important issue, therefore, the optimization of this characteristic is very important. As in the transport sector, humidity resistance of WAL panels is very important for several interviewees. Therefore, evaluation of the physical and mechanical properties of WAL panels when the material is wet is important. Another category suggested by interviewees is the surface treatment. Among surface treatment suggested are paint, clean look, and non-slippery.

6.7. Conclusions

The main objective of the research was to identify the potential applications of WAL panels produced in laboratory, based on the information obtained through qualitative research. Semi-structured interview technique with open-ended questions were used to gather qualitative textual data. Eleven interviews have been carried out covering the different sectors proposed in the research. The majority of interviewees are highly involved in the product development process. The interviewees presented extensive professional experience in different fields such as project management, product development process, construction systems, structural design, eco-design, technical standards, and marketing, among others. The interviewees emphasized the importance of the characteristics and final application of a material in the product developing process. Several technical characteristics such as mechanical properties; weight; moisture and fire resistance were considered important.

The coding of interviews with respect to potential applications of WAL panels determined different categories of which the most outstanding are:

- In the building materials category, the application as panel for raised flooring was the most suggested by the interviewees. The information about this type of product confirms the potential of WAL panels for this application, although complementary tests and other characteristics are necessary to determine its applicability.

- In the furniture category, the bathroom dividers application was the most often suggested. WAL panels present interesting features such as resistant, aesthetic, and easy cleaning. Likewise, other water resistance tests would confirm this potential application.
- In panel category, bracing and decorative panel applications were the most often suggested for interviewees. WAL panels could be used in structures that require major shear resistance.

Finally, the interviewees proposed some improvements for WAL panels such as the moisture resistance and core thickness. These suggestions could ensure certain potential applications mentioned above.

Conclusion générale

Le principal objectif de ce projet de recherche était de développer un matériau composite à base de bois laminé avec alliage d'aluminium. Afin d'atteindre cet objectif de recherche, nous avons divisé ce projet en trois étapes principales.

Tout d'abord, la première étape du projet a permis de sélectionner, parmi de nombreux matériaux composites, le meilleur substrat aux lames de plancher d'ingénierie en prenant comme critère de sélection le module d'élasticité de chacun des matériaux. Ensuite, des essais préliminaires ont été réalisés pour observer la performance de certains matériaux composites au test de la déformation au tuilage. Par ailleurs, ce travail a aussi impliqué le développement de panneaux contreplaqués de peuplier-faux-tremble renforcés avec des tissus de fibres naturelles ou des tissus de fibres synthétiques. Ces essais préliminaires ont servi à clarifier la continuation du travail de recherche en concluant que la configuration des panneaux contreplaqués renforcés ne présente pas d'augmentation significative des propriétés mécaniques.

Toujours dans cette première étape, les matériaux composites à base de bois laminé avec alliage d'aluminium ont été développés en utilisant des panneaux MDF, HDF, LPO et contreplaqués comme noyau et deux tôles d'alliage d'aluminium comme peaux, collés avec un adhésif de polyuréthane. Les résultats montrent que les propriétés physiques et mécaniques des matériaux composites laminés ont été améliorées avec l'alliage d'aluminium. Les matériaux développés ont montré une excellente stabilité dimensionnelle. Les valeurs de gonflement d'épaisseur et d'absorption d'eau ont été nettement réduites, à l'exception du matériau MDF laminé. Les coefficients de dilatation linéaires (β) des matériaux HDF et contreplaqués laminés ont également été réduits à la suite du laminage.

Les résultats ont montré que les valeurs de l' E_{app} et du MOR ont augmenté significativement par rapport aux matériaux composites à base de bois sans laminage. Les valeurs d' E_{app} ont été augmentées de 554%, 570%, 316% et 215% pour les matériaux HDF, MDF, LPO et contreplaqués, respectivement. Les valeurs de MOR ont été

augmentées de 335%, 366%, 225% et 185% pour les matériaux HDF, MDF, LPO, contreplaqués, respectivement. Les valeurs de résistance au cisaillement des matériaux laminés avec LPO et contreplaqués comme noyau ont été augmentés de 44% et 77% respectivement par rapport aux composites à base de bois sans laminage. L'absence d'échec dans l'interface aluminium/bois a démontré une bonne adhérence du polyuréthane. Les résultats ont été confirmés par les essais de résistance à la traction perpendiculaire à la surface.

Les comparaisons avec le matériau composite nid d'abeille en aluminium ont démontré des performances mécaniques similaires. Le matériau nid d'abeilles en aluminium est cependant trois fois plus léger. Néanmoins, les matériaux développés présentent des coûts de fabrication beaucoup plus faibles, mais trop élevé pour être considérés comme substrat dans les lames de plancher d'ingénierie. D'après les résultats, on peut conclure que les propriétés physiques et mécaniques des composites à base de bois ont été grandement améliorées par le laminage avec des tôles d'alliage d'aluminium ouvrant la porte à une nouvelle gamme d'applications.

La deuxième étape du processus de développement du matériau composite a été destinée à déterminer la performance environnementale des matériaux composites. Une analyse de cycle de vie a été réalisé pour comparer les choix des matériaux. En général, les résultats de la comparaison des matériaux composites développés par rapport au matériau nid d'abeille en aluminium indiquent que les premières ont présenté un impact moins négatif dans les catégories « changements climatiques », « santé humaine » et « ressources », alors que la fabrication de matériau nid d'abeille a présenté moins d'impact négatif dans la catégorie « qualité de l'écosystème ». Les avantages environnementaux des matériaux développés se trouvent principalement dans la réduction de la quantité d'aluminium primaire et dans l'utilisation de matériaux composites à base de bois comme noyau.

Les résultats d'ACV ont montré les avantages environnementaux de l'utilisation de composites à base de bois dans le développement d'un matériau composite à structure sandwich. Les émissions associées à la fabrication de l'aluminium primaire dans le matériau nid d'abeille ont plus contribué aux impacts environnementaux négatifs.

Cependant, l'analyse des phases d'utilisation et de fin de vie pourrait modifier les résultats de l'analyse du cycle de vie.

Les résultats de l'analyse des contributions ont démontré que les émissions liées à la fabrication de tôles d'alliage d'aluminium ont été la principale cause de l'impact environnemental négatif pour chaque matériau composite laminé. Ces émissions ont contribué entre 71% et 88% de l'impact négatif total sur la santé humaine, les changements climatiques et les catégories de ressources, tandis que les émissions liées aux composites à base de bois se sont situées entre 5% et 20% de l'impact négatif total sur les mêmes catégories. L'analyse des contributions a également démontré que les émissions liées à la fabrication des matériaux composites à base de bois ont contribué principalement à l'impact négatif total de la fabrication de matériaux développés dans la catégorie « qualité de l'écosystème ». L'impact négatif de la fabrication de composites à base de bois a été principalement lié aux émissions des procédés de fabrication d'adhésifs.

Cette deuxième étape a démontré l'utilité de la méthodologie ACV dans le processus de développement des matériaux composites laminés par rapport au matériau nid d'abeille en aluminium. Les résultats ont permis d'identifier les avantages environnementaux de la fabrication de matériaux composites développés comme alternative à l'application de matériau nid d'abeille en aluminium. Le matériau développé peut remplacer le matériau nid d'abeille lorsque le poids du matériau n'est pas critique, en considérant que le premier est plus lourd, mais que les deux ont des propriétés mécaniques comparables.

Enfin, les applications potentielles de matériaux composites à base de bois laminé avec alliage d'aluminium ont été déterminées en utilisant une méthodologie de recherche qualitative basée sur la théorie ancrée. En considérant, les propriétés physiques et mécaniques, les coûts de production et la performance environnementale des matériaux composites développés. Une technique d'entrevue semi-structurée avec des questions ouvertes a été utilisée pour recueillir des données textuelles qualitatives. Les résultats du codage du contenu des entrevues ont suggéré trois applications potentielles principales dans différentes catégories. Dans la catégorie des matériaux de construction, l'application la plus souvent suggérée par les personnes interviewées a été celle de l'utilisation pour les

planchers surélevés. Les informations complémentaires de ce type de produit confirment le potentiel des matériaux développés pour cette application, bien que des essais futurs sont nécessaires pour déterminer son applicabilité. Dans la catégorie de mobilier, l'application comme diviseurs de salle de bain a été la plus souvent suggérée. Les matériaux développés présentent des caractéristiques intéressantes telles que la facilité d'entretien et l'esthétique. De même, d'autres tests confirmeraient son applicabilité. Dans la catégorie des panneaux, les applications comme panneau de contreventement ou panneau décoratif ont été les plus souvent suggérées par les personnes interviewées.

Enfin, toute cette étude sur le développement du matériau composite à base de bois laminé avec alliage d'aluminium a démontré le potentiel que celui-ci pourrait avoir pour différentes applications grâce à ces propriétés physiques et mécaniques, son faible coût de fabrication et son avantage au niveau environnemental.

Bibliographie

- Abdul Khalil, H. P. S., Nurul Fazita, M. R., Bhat, A. H., Jawaid, M et Nik Fuad, N. A. 2010. Development and material properties of new hybrid plywood from oil palm biomass. *Materials and Design*. 31: 417-424.
- Aluminium Association. Inc. 2013. The Environmental Footprint of Semi-Finished Aluminum Products in North America. A Life Cycle Assessment Report. 123p.
- ANSI. 2009. American National Standard. Medium density fiberboard (MDF) for interior application. ANSI A208.2. 2009. Composites Panels Association.
- Ashby, M.F. 1999. *Materials Selection in Mechanical Design*, 2nd ed. Butterworth-Heinemann, Woburn.
- Association de l'aluminium du Canada. 2017. Production d'aluminium primaire au Canada. Rapport de production pour avril 2017.
- ASTM International. 2012. Standard Test Methods for Evaluating Properties of Wood-Base Fiber and Particle Panel Materials. ASTM D1037.06a. ASTM International West Conshohocken, PA.
- ASTM International. 2013. Standard test methods for specific gravity of wood and wood-based materials. ASTM D2395-07. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM International. 2013. Standard test methods for direct moisture content measurement of wood and wood-based materials. ASTM D4442-07, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Aubin-Auger, I., Mercier, A., Baumann, L., Lehn-Drylewicz, A-M., Imbert, P., Letrilliart, L et le groupe de recherche universitaire qualitative médicale francophone. 2008. Introduction à la recherche qualitative. *Exercer : la revue française de médecine générale*. Vol. 19 (84): 142-145.
- Ayrilmis, N., Candan, Z et Hiziroglu, S. 2008. Physical and mechanical properties of cardboard panels made from used beverage carton with veneer overlay. *Materials and Design* 29, 1897-1903. DOI: 10.1016/j.matdes.2008.04.030.
- Ayrilmis, N., Laufenberg, T et Winandy, J. 2009. Dimensional stability and creep behavior of heat-treated exterior medium density fiberboard. *Eur. J. Wood Prod.* 67: 287-295.
- Barbuta, C., Blanchet, P., Cloutier, A., Yadama, V et Lowell, E. 2010. OSB as substrate for engineered wood flooring. *Eur. J. Wood Prod.* DOI 10.1007/s00107-010-0494-y.

- Bare, J. C. 2011. TRACI 2.0 - The Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and other environmental Impacts. *Clean Technologies and Environmental Policy*. Springer-Verlag, New York, NY, 13(5): 687-696.
- Batouli, S., Zhua, Y., Narb, M et D'Souza, N. 2014. Environmental performance of kenaf-fiber reinforced polyurethane: a life cycle assessment approach. *J. Clean. Prod* 66: 164-173.
- Bathias, C. 2009. *Matériaux composites. L'usine nouvelle* DUNOD. Paris. 511p.
- Beaulieu, D. 2013. *Les caractéristiques de l'aluminium structural*. 2e édition. Les presses de l'aluminium. 132 p.
- Beauregard, R., Bernier, P., Bouthillier, L., Levasseur, A., Paré, D., St-Laurent-Samuel, A et Thiffault, E. 2012. The use of biomass to reduce greenhouse gaz emissions in Quebec. Scientific advisory report, Submitted to the Ministry of Natural Resources of Québec, October 2012, 19 p.
- Belem, G. 2005. *L'analyse du cycle de vie comme outil de développement durable*. Les cahiers de la Chaire – collection recherche No 08-2005. Université du Québec à Montréal. 54p.
- Belouettar, S., Abbadi, A., Azari, Z., Belouettar, R et Freres, P. 2009. "Experimental investigation of static and fatigue behaviour of composites honeycomb materials using four point bending tests," *Composite Structures* 87: 265-273. DOI: 10.1016/j.compstruct.2008.01.015
- Berglund, L et Rowell, R M. 2005. Chapter 10: Wood Composites. In *Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites*. 1re édition. CRC Press. États-Unis. 487p.
- Berthlot, J-M. 2005. *Matériaux composites : Comportement mécanique et analyse des structures*. 4e édition. Editions TEC & DOC. Paris. 645p.
- Biblis, E et Carino, H. 2000. Flexural properties of southern pine plywood overlaid with fiberglass-reinforced plastic. *Forest Prod. J.* 50(4): 34-36.
- Biblis, E. J., Grigoriou, A et Carino, H. 1996. Flexural properties of veneer-overlaid OSB composite panels from southern yellow pine. *Forest Products Journal* 46(4): 59-62.
- Bitzer, T. 1997. *Honeycomb Technology. Materials, desing, manufacturing, applications ans testing*. Chapman & Hall. London, UK. 233p.
- Blanchet, P. 2004. *Caractérisation du comportement des lames de plancher d'ingénierie*. Thèse de doctorat. Université Laval, Québec, Canada, 116p.
- Blanchet, P. 2008. Long-term performance of engineered wood flooring when exposed to temperature and humidity cycling. *Forest Products Journal* 58 (9): 37-44.

- Bodig, J et Jayne, B. 1993. *Mechanics of Wood and Wood Composites*, Van Nostrand Reinhold Company, New York, 712 pp.
- Borysiuk, P., Dziurka, D., Jablonski, M., Kundzewicz, A et Zbiec, M. 2007. Glass-fiber reinforced chipboard. *For. And Wood Technol.* 61: 67-70.
- Bouffard, J.F et Amiotte, C. 2011. Development of a wood based reinforced composite. Project N° 201002778-Task 1.3. Final Report 2010/2011. Value-Added Products Department, FPInnovations. Canada. 25p.
- Bovea, M.D et Vidal, R. 2004. Increasing product value by integrating environmental impacts, costs and customer valuation. *Journal of Resources Conservation Recycling* 41: 133-145.
- Bucur, V. 2011. *Delamination in Wood, Wood Products and Wood-Based Composites*. CSIRO. Clayton Laboratories. Materials Sciences and Engineering. Australia. 401p.
- Buchanan, A.H et Levine, S.B. 1999. Wood-based building materials and atmospheric carbon emissions. *Environmental Sciences & Policy.* 2: 427-437.
- Büyüksari, U., Hiziroglu, S., Akkiliç, H et Ayırlmis, N. 2012. Mechanical and physical properties of medium density fiberboard panels laminated with thermally compressed veneer. *Composites: Part B* 43: 110-114. DOI: 10.1016/j.compositesb.2011.11.040.
- Cai, Z. 2006. Selected properties of MDF and flakeboard overlaid with fiberglass mats. *Forest Products Journal* Vol. 56(11–12): 142-146.
- Cai, Z et Ross, R. J. 2010. “Mechanical properties of wood-based composite materials,” in: *Wood Handbook: Wood as an engineering material*, Centennial ed. General Technical Report FPL GTR-190, USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, Madison, WI.
- Cantwell, W.J et Davies, P. 1996. A study of skin-core adhesion in glass fibre reinforced sandwich materials. *Applied Composite Materials.* 3: 407-420.
- Carlsson, L. A et Kardomateas, G. A. 2011. *Structural and failure mechanics of sandwich composites*. Solid mechanics and its applications series, Vol. 121, Springer Science+Business Media. 386 p. DOI 10. 1007/978-1-4020-3225-7.
- Castanié, B. 2000. *Contribution à l'étude des structures sandwichs dissymétriques*. Thèse de Doctorat. École Supérieure de l'Aéronautique et de l'Espace. France. 208p.
- Cerbu, C., Curtu, I., Ciofoaia, V., Rosca I. C et Hanganu, L. C. 2010. Effects of the wood species on the mechanical characteristics in case of some E-glass fibres/wood flour/polyester composite materials. *Materiale Plastice*, ISSN0025-5289, Vol. 47(1): 109-114.

- Chan, G. 2012. Sustainability Assessment of OSB and Softwood Plywood manufacturing in North America. A Report Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Bachelor of Science in Wood Products Processing In The Faculty Forestry. 71p.
- Chang, D., Lee, C. K. M et Chen, C-H. 2014. Review of life cycle assessment towards sustainable product development. *J. Clean. Prod.* 83: 48-60.
- Chapman, K. 2006. 12th Chapter of Primary Wood Processing. Walker, J.CF. Springer Netherlands 2nd Edition. ISBN: 978-1-4020-4392-5. 562 p.
- Charmaz, K. 2015. Grounded Theory: Methodology and Theory Construction. *International Encyclopedia of the Social & Behavioral Sciences*, Vol 10: 402-407.
- Ciacci, L., Eckelman, M., Passarini, F., Chen, W-Q., Vassura, I et Morselli, L. 2014. Historical evolution of greenhouse gas emissions from aluminum production at a country level. *J. Clean. Prod.* 84: 540-549.
- CIRAIG. 2005. Life Cycle Thinking. http://www.ciraig.org/en/pensee_e.html. Accessed 02. March 2011.
- Cloutier, A. 2006. Notes de cours. SBO-2006- Panneaux Agglomérés. Faculté de foresterie et de géomatique. Université Laval.
- Cobut, A. 2014. Écoconception des produits d'apparence en bois pour la construction non-résidentielle. Thèse de Doctorat. Université Laval. Canada. 287p.
- De Figueiredo, J. V., Texeira, D. E et Batista, D. C. 2009. Overlay of Eucalyptus urophylla cement-bonded particleboard for application as flooring panels, Technical note. *Forest Products Journal.* 59(6): 65-69.
- Denzin, N.K et Lincoln, Y.S. 2012. Manual de investigación cualitativa. El campo de la investigación. Vol. 1. Barcelona: Gedisa.
- Ding, N., Gao, F., Wang, X., Gong, X et Nie, Z. 2012. Environment impact analysis of primary aluminum and recycled aluminum. *Procedia Engineering.* 27: 465-474.
- Dos Santos, M, F., Battistelle, R., Stolte, B et Varum, H. 2014. Comparative study of the life cycle assessment of particleboards made of residues from sugarcane bagasse (*Saccharum spp.*) and pine wood shavings (*Pinus elliottii*). *J. Clean. Prod.* 64: 345-355.
- Duflou, J. R, Yelin, D., Van Acker, K et Dewulf, W. 2014. Comparative impact assessment for flax fibre versus conventional glass fibre reinforced composites: Are bio-based reinforcement materials the way to go? *CIRP Annals – Manufacturing Technology.* 63: 45-48.

- Ecoinvent Centre, 2015. Ecoinvent Database v3.2. Swiss Centre for Life Cycle Inventories 2015. <http://www.ecoinvent.org/database/older-versions/ecoinvent-32/ecoinvent-32.html>.
- EPA, 2014. Framework for Assessing Biogenic CO₂ Emissions from Stationary Sources: U.S. Environmental Protection Agency, Office of Air and Radiation Office of Atmospheric Programs, Climate Change Division. <https://www.epa.gov/climatechange/november-2014-revised-framework-assessing-biogenic-co2-emissions-stationary-sources>.
- European Standard. 2002. Wood-based panels-surface soundness-test method. European Committee for Standardization, European Standard EN 311:2002, Brussels, Belgium.
- Flick, U. 2011. Introducción a la colección: Investigación cualitativa. En Kvale, S. Las entrevistas en investigación cualitativa. Madrid: Ediciones Morata. 11-16.
- Flick, U. 2012. Introducción a la investigación cualitativa. Madrid: Ediciones Morata.
- Gay, D. 2005. Matériaux composites. Hermes Science Publications. 5e édition révisée. Francia. 670p.
- Gminski, R., Tang, T et Mersch-Sundermann, V. 2010. Cytotoxicity and genotoxicity in human lung epithelial A549 cells caused by airborne volatile organic compounds emitted from pine wood and oriented strand boards. *Toxicology Letters* 196: 33-41.
- Glaser, B et Strauss, A. 1967. The discovery of grounded theory: strategies for qualitative research. Chicago: Aldine Pub. Co. USA. 271p.
- González-García, S., Feijoo, G., Widsten, P., Kandelbauer, A., Zikulnig-Rusch, E et Moreira, M. 2009. Environmental performance assessment of hardboard manufacture. *Int J Life Cycle Assess.* 14: 456-466.
- González-García, S., Feijoo, G., Heathcote, C et Kandelbauer, A. 2011. Environmental assessment of Green hardboard production coupled with a laccase activated system. *J. Clean. Prod.* 19: 445-453. DOI:10.1016/j.jclepro.2010.10.016
- Goutianos, S., Peijs, T., Nystrom, B et Skrifvars, M. 2006. Development of Flax Fibre based Textile Reinforcements for Composite Applications. *Appl Compos Mater.* 13: 199-215. DOI 10.1007/s10443-006-9010-2.
- Hennebo, N. 2009. Guide du bon usage de l'analyse par théorisation ancrée par les étudiants en médecine. Version 1.0. Université Lille. 39p.
- Hernández, R. 2014. La investigación cualitativa a través de entrevistas: su análisis mediante la teoría fundamentada. *Cuestiones Pedagógicas.* 187-210.

- Hong, J., Zhou, J., Hong J et Xu, X. 2012. Environmental and economic life cycle assessment of aluminum-silicon alloys production: a case study in China. *J. Clean. Prod.* 24: 11-19.
- Hse, C-Y., Shupe, F., Pan, H et Feng, F. 2012. Veneer-reinforced particleboard for exterior structural composition board. *Forest Products Journal* 62(2): 139-145.
- Hutchison, A, J., Johnston, L, H et Breckon, J, D. 2010. Using QSR-NVivo to facilitate the development of a grounded theory project: an account of a worked example. *International Journal of Social Research Methodology*. Vol 13 (4): 283-302.
- Irigaray, P., Newby, J.A. Clapp, R., Hardell, L., Howard, V., Montagnier, L., Epstein, S et Belpomme, D. 2007. Lifestyle-related factors and environmental agents causing cancer: An overview. *Biomedicine & Pharmacotherapy* 61: 640-658.
- ISO, 2006a. ISO 14040. International Standard. In: *Environmental management - Life cycle assessment - Principles and Framework*. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- ISO, 2006b. ISO 14044. International Standard. In: *Environmental Management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines*. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- Jantunen, S et Gause, D.C. 2014. Using a grounded theory approach for exploring software product management challenger. *The journal of Systems and Software*. 95: 32-51.
- Jen, Y-M et Chang, L-Y. 2008. Effect of thickness of face sheet on the bending fatigue strength of aluminum honeycomb sandwich beams. *Engineering Failure Analysis*. 15: 1282-1293.
- Jolliet, O., Margni, M., Charles, R., Humbert, S., Payet, J et Rebitzer, G. 2003. IMPACT2002+: a new life cycle impact assessment methodology. *Int J Life Cycle Assess* 8(6), 324-330.
- Jolliet, O., Saadé, M., Crettaz, P et Shaked, S. 2010. *Analyse du cycle de vie: Comprendre et réaliser un écobilan, 2ème édition*. Science et ingénierie de l'environnement, 2ème édition edn. Presses polytechniques et universitaires romandes.
- Kawasaki, T., Zhang, M et Kawai, S. 1999. Sandwich panel of veneer-overlaid low-density fiberboard. *J. Wood Sci.* 45:291-298.
- Kim, M.H et Song, H.B. 2014. Analysis of the global warming potential for wood waste recycling systems. *J. Clean. Prod.* 69. 199-207.
- Kim, S. 2010. The reduction of formaldehyde and VOCs emission from wood-based flooring by green adhesive using cashew nut shell liquid (CNSL). *Journal of Hazardous Materials* 182: 919-922.

- Kilic, M., Burdurlu, E., Aslan, S., Altun, S et Tumerdem, O. 2009. “The effect of surface roughness on tensile strength of the medium density fiberboard (MDF) overlaid with polyvinyl chloride (PVC),” *Material and Design* 30 : 4580-4583. DOI: 10.1016/j.matdes.2009.03.029.
- Kishi, H et Fujita A. 2008. “Wood-based epoxy resins and the ramie fiber reinforced composites,” *Environmental Engineering and Management Journal*. “Gh. Asachi” Technical University of Iasi, Romania. 7(5) : 517-523.
- Kline, E. 2005. Gate-to-gate life-cycle inventory of oriented strandboard production. *Wood Fiber Sci*, 37 (Corrim Special Issue). 74-84.
- Kouchaki-Penchah, H., Sharifi, M., Mousazadeh, H et Zarea-Hosseiniabadi, H. 2016. Life cycle assessment of medium-density fiberboard manufacturing process in Islamic Republic of Iran. *J. Clean. Prod.* 112: 351-358.
- La Rosa, A et Cicala, G. 2015. LCA of fibre-reinforced composites. *Handbook of Life Cycle Assessment (LCA) of Textiles and Clothing*. Woodhead Publishing Series in Textiles: Number 172. 377 p.
- La Rosa, A., Reccab, G., Summerscalesc, J., Latteria A., Cozzoa, G et Cicalaa, G. 2014. Bio-based versus traditional polymer composites. A life cycle assessment perspective. *J. Clean. Prod.* 74 : 135-144.
- Lépine, E. 2013. Synthèse d'adhésifs thermodurcissables à base de farine de soya et de furfural pour la fabrication de panneaux composites en bois. Thèse de doctorat. Université Laval, Québec, Canada, 158p.
- Li, X et Weitsman, J. 2004. “Sea-water effects on foam-cored composite sandwich lay-ups,” *Composite: Part B* 35: 451-459. DOI: 10.1016/j.compositesb.2004.04.012
- Liu, G et Müller, D. 2012. Addressing sustainability in the aluminum industry: a critical review of life cycle assessments. *J. Clean. Prod.* 35: 108-117.
- Manalo, A. C., Aravinthan, T et Karunasena, W. 2013. “Shear behaviour of glued structural fibre composite sandwich beams,” *Construction and Building Materials* 47: 1317-1327. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.06.025
- Manolo, A. C. Aravinthan, T. Karunasena, W et Islam, M. M. 2010. Flexural behaviour of structural fibre composite beams in flatwise and edgewise positions. *Composite Structures*. 92: 984-995.
- Malavia, J. V. 2012. Caracterización de paneles sandwich híbridos FRP con alma de nido de abeja de aluminio. Mémoire de maîtrise. Universidad Politécnica de València. 146p.
- Maloney, T. 1993. *Modern particleboard & process fiberboard manufacturing*. San Francisco: Miller Freeman publications. 681p.

- Margni, M. 2014. Notes de cours. DDI8003: Analyse du cycle de vie. École Polytechnique Montréal.
- Marouene, A. 2010. Comportement sous choc des composites sandwichs et influence des paramètres des matériaux et du test. Mémoire de maîtrise en sciences appliquées. École polytechnique de Montréal. 90p.
- Martineau, P. 1987. Les matériaux composites dans le bâtiment. Matériaux composites et industrie. Institut des matériaux composites. 48p.
- Mason, M. 2010. Sample size and saturation in PhD studies using qualitative interviews. Forum: Qualitative social research. FQS 11(3): Art 8.
- Mohebbi, B., Tavassoli, F et Kazemi-Najafi, S. 2011. Mechanical properties of medium density fiberboard reinforced with metal and woven synthetic nets. Eur. J. Wood Prod. 69: 199-206. DOI: 10.1007/s00107-010-0412-3
- Morse, J.M. 1994. Critical issues in qualitative research methods. SAGE Publications. London. United Kingdom. 395p.
- Nebel, B., Alcorn, A et Wittstock, B. 2011. Life Cycle Assessment: Adopting and Adapting Overseas LCA Data and Methodologies for Building Materials in New Zealand. SCION. Ministry of Agriculture and Forestry. 56p.
- Nielsen, P.H et Wenzel, H. 2002. Integration of environmental aspects in product development: a stepwise procedure based on qualitative life cycle assessment. J. Clean. Prod. 10: 247-257.
- Norgate, T.E., Jahanshahi, S et Rankin, W.J. 2007. Assessing the environmental impact of metal production processes. J. Clean. Prod. 15(8-9): 838-848.
- O'Reilly, M et Parker, N. 2012. Unsatisfactory Saturation: a critical exploration of the notion of saturated sample sizes in qualitative research. Qualitative Research. 13(2): 187-197.
- Paik, J-K., Thayamballi, A-K et Sung Kim, G. 1999. The strength characteristics of aluminum honeycomb sandwich panels. Thin-Walled Structures. 35: 205-231.
- Patton, M. 1990. Qualitative evaluation and research methods. Beverly Hills, CA: Sage. 169-186.
- Piekarski, C. M., De Francisco, A. C., Da Luz, L. M., Kovaleski, J. L et Silva, D. A. L. 2017. Life cycle assessment of medium-density fiberboard (MDF) manufacturing process in Brazil. Science of the Total Environment. 575: 103-111.
- Pokharel, N et Mahendran, M. 2003. Experimental investigation and design of sandwich panel subject to local buckling effects. Journal of Constructional Steel Research 59(12): 1533-1552. DOI: 10.1016/S0143-974X(03)00084-1

- Puettmann, M., Oneil, E et Wilson, J. 2013a. Cradle to Gate Life Cycle Assessment of U.S. Medium Density Fiberboard Production. August 2013. 26p.
- Puettmann, M., Oneil, E., Wilson, J et Johnson, L. 2013b. Cradle to Gate Life Cycle Assessment of Softwood Plywood Production from the Pacific Northwest. December 2012, April 2013. 34p.
- Puettmann, M., Oneil, E., Kline, E et Johnson, L. 2013c. Cradle to Gate Life Cycle Assessment of Oriented Strandboard Production from the Southeast. December 2012, Update April 2013. 35 p.
- RISI. 2013. North American wood panels 5-year forecast. RISI 13(4): 207.
- Rivela, B., Hospidio, A., Moreira, M et Feijoo, G. 2006. Life cycle inventory of particleboard: a case study in the wood sector. Int. J. Life Cycle Assess. 11 (2): 106-113. DOI:10.1065/lca2005.05.206.
- Rivela, B., Moreira, M. T et Feijoo, G. 2007. Life cycle inventory of Medium Density Fibreboard. Int. J. LCA 12(3): 143-150.
- Segovia, F., Blanchet, P., Barbuta, C et Beauregard, R. 2015. "Aluminum-laminated panels: Physical and mechanical properties," BioRes. 10(3): 4751-4767.
- Segovia, F., Blanchet, P., Amor, B., Barbuta, C et Beauregard, R. 2017. Life cycle assessment contribution in the product development process: Case study of wood aluminum-laminated panel. Article soumis à International Journal of Product Development.
- Sevigné-Itoiz, E., Gasol, C., Rieradevall, J et Gabarrell, X. 2014. Environmental consequences of recycling aluminum old scrap in a global market. Resources, Conservation and Recycling 89: 94-103.
- Shipsha, A. 2001. Failure of sandwich structures with sub-interface damage. Department of Aeronautics. Royal Institute of Technology. Stockholm. Sweden. 17p.
- Shipsha, A. 2013. Failure of sandwich structures with sub-interface damage. Report 2001-13, Division of Lightweight Structures, Department of Aeronautics, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.
- Silva, D. A. L., Rocco Lahr, F. A., Varanda, L. D, Christoforo, A. L et Ometto, A. R. 2015. Environmental performance assessment of the melamine-urea-formaldehyde (MUF) resin manufacture: a case study in Brazil. J. Clean. Prod. 96: 299-307.
- Siriruk, A., Penumadu, D et Weitsman, Y. 2008. Effect of sea environment on interfacial delamination behavior of polymeric sandwich structures. Composites Science and Technology DOI: 10.1016/j.compscitech.2008.02.033.

- Smulski, S et Ifju, G. 1986. Flexural behavior of glass fiber reinforced hardboard. *Wood and Fiber Science*. 19(3): 313-327.
- Song, Y., Youn, J et Gutowski, T. 2009. Life cycle energy analysis of fiber-reinforced composites. *Composites: Part A* 40: 1257-1265.
- Spelter, H., McKeever, D et Alderman, M. 2006. "Status and trends: Profile of structural panels in the United States and Canada," Research Note FPL-RP-636, USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, Madison, WI.
- Stark, N., Cai, Z et Carll, C. 2010. Woo-based Composite Materials. Panel products, Glued-Laminated Timber, Structural Composite Lumber, and Wood-Nonwood Composite Materials, in: *Wood Handbook Wood as an Engineering Material*. General Technical Report FPL-GTR-190. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 508p.
- Stephen, J et Wood-Bohm, S. 2016. Canada's leading cleantech opportunity for greenhouse gas reduction and economic prosperity. *Biomass Innovation*. 14p.
- Strauss, A. L. 1987. *Qualitative analysis for social scientists*. New York: Cambridge University Press.
- Strauss, A. L et Corbin, J. 1990. *Basics of Qualitative Research – Grounded Theory Procedures and Applications*. Sage Publications. Newbury Park, CA.
- Suppen, N et Van Hoof, B. 2005. *Conceptos básicos del Análisis de Ciclo de Vida y su aplicación en el Ecodiseño*. Centro de Analisis de Ciclo de Vida y Diseño Sustentable. Mexico. 40p.
- Tan, R. B. H et Khoo, H. H. 2005. An LCA study of a primary aluminum supply chain. *J. Clean. Prod.* 13: 607-618.
- Umair, S. 2006. *Environmental Impacts of Fiber Composite Materials. Study on Life Cycle Assessment of Materials used for Ship Superstructure*. Master Thesis. Environmental Strategies Research. 63p.
- Wakeman, M. D et Månson, J.-A. E. 2004. *Composites manufacturing-themoplastics. Design and Manufacture of Textile Composites*, 1st Ed. Woodhead Publishing Limited, England.
- Wilson, J. 2008. *Medium Density Fiberboard (MDF): A Life-cycle inventory of manufacturing panels from resource through product*. Corrim: Phase II. Final Report. 50p.
- Wilson, J. 2010. Life-cycle inventory of formaldehyde-based resins used in wood composites in terms of resources, emissions, energy and carbon. *Wood Fiber Sci.* 42 (Corrim Special Issue): 125-143.

- Xu, H., Nakao, T., Tanaka, C., Yoshinobu, M et Katayama, H. 1998a. Effects of fiber length and orientation on elasticity of fiber-reinforced plywood. *J. Wood Sci.* 44: 343-347.
- Xu, H., Tanaka, C., Nakao, T et Katayama, H. 1998b. Mechanical properties of plywood reinforced by bamboo or jute. *Forest Prod. J.* 48(1): 81-85.
- Xu, X., Jayaramana, K., Morin, C et Pecqueux, N. 2008. Life cycle assessment of wood-fibre-reinforced polypropylene composites. *J. Materials Processing Technology* 198: 168-177.
- Yemele, M. C. 2017. Portrait et opportunités de l'industrie des panneaux composites à base de bois. Conference dans le cadre de cours Panneaux agglomérés. Université Laval.
- Zhang, Y., Sun, M., Hong, J., Han, X., He, J., Shi, W et Li, X. 2016. Environmental footprint of aluminum production in China. *J. Clean. Prod.* 133: 1242-1251.
- Zeller, V., Richard, A., Degrez, M., Thyssen, N et De Boever, L. 2015. Life Cycle Assessment of Medium Density Fibreboard LCA at product level. ENECOBOIS Project : Réduction de l'impact énergétique de la filière bois-construction grâce à l'analyse multicritère du cycle de vie. 38p.

Annexes

Annexe A-1 : Contenu du courriel et/ou appel téléphonique

Développement d'un matériau composite à base de bois laminé avec alliage d'aluminium
Bonjour M/Mme

Je suis étudiant au doctorat dans le programme de Sciences du bois à l'Université Laval et je travaille sur un projet de recherche sur le développement de matériaux composites sous la direction de M. Pierre Blanchet et la codirection de M. Robert Beauregard de l'Université Laval.

L'objectif de notre recherche vise le développement d'un matériau composite à base de bois laminé avec alliage d'aluminium (structure sandwich). Toutefois, nous souhaitons obtenir l'avis de différents experts sur les applications potentielles de ces matériaux composites que nous avons développé.

Nous sollicitons votre participation à une entrevue afin de connaître votre opinion sur le matériau composite développé. L'entrevue aura une durée de 45 à 60 minutes. Elle nous permettra de connaître votre opinion sur les avantages et les inconvénients des quatre types de matériau composite à base de bois développés et sur les applications potentielles de ceux-ci.

Si vous acceptez cette invitation, toute l'information et les données recueillies resteront confidentielles. Les résultats généralisés seront publiés dans des revues scientifiques en conservant votre anonymat.

Si vous acceptez de participer, nous aimerions coordonner la date, l'heure et le lieu de l'entrevue. L'entrevue sera enregistrée sous condition de votre consentement.

Vous êtes libre de participer ou de refuser cette entrevue. Si vous acceptez, vous pourrez mettre fin à votre participation en tout temps, sans conséquence négative ou préjudice, et sans avoir à justifier votre décision.

Si vous avez des questions sur la recherche ou sur les implications de votre participation, veuillez communiquer avec l'une ou l'autre des deux personnes suivantes :

Franz Segovia Abanto, étudiant au doctorat
Téléphone : (418) 656-2131 poste 12561
Courriel : franz.segovia-abanto.1@ulaval.ca

Pierre Blanchet, PhD, professeur agrégé
Téléphones : (418) 656-7954
Courriel : pierre.blanchet@sbf.ulaval.ca

Votre collaboration est précieuse pour la réalisation de cette recherche et nous vous remercions de votre participation!

Ce projet a été approuvé par le Comité d'éthique de la recherche de l'Université Laval : No d'approbation 2015-045 / 10-04-2015

Annexe A-2 : Instrument de collecte des données

GUIDE POUR LA RÉALISATION D'UNE INTERVIEW DANS LE CADRE DU PROJET DE RECHERCHE INTITULÉ : DÉVELOPPEMENT D'UN MATÉRIAU COMPOSITE À BASE DE BOIS LAMINÉ AVEC ALLIAGE D'ALUMINIUM.

DÉFINITION DU PROBLÈME

Les panneaux agglomérés (composites à base de bois) sont communément classifiés en panneaux structuraux lesquels offrent une importante résistance mécanique et en panneaux non structuraux lesquels ne requièrent pas une résistance mécanique importante. Ces panneaux (structuraux et non structuraux) offrent des bonnes propriétés physiques et mécaniques selon leur utilisation, mais aussi des certaines faiblesses comme une faible résistance à l'adsorption d'eau, une faible stabilité dimensionnelle et une vie utile limitée lorsqu'ils sont exposés à des changements d'humidité relative. Le projet de recherche a développé un matériau composite à base de bois laminé avec alliage d'aluminium (structure sandwich) avec de propriétés physiques et mécaniques supérieur par rapport au panneau agglomérés commercialisé. Le projet visé à déterminer des applications potentielles des quatre types de matériau composite à base de bois laminé avec alliage d'aluminium développés. Pourtant, la perception des experts dans le processus de développement des produits, en considérant les propriétés physiques et mécaniques des matériaux composites sera importante pour réussir l'objectif du projet.

PARTICIPANTS

1. Identification et classification de participants des entrevues.
 - 1.1. Producteur de produits structuraux.
 - 1.1.1. Pour les bâtiments.
 - 1.1.2. Pour le transport terrestre.
 - 1.2. Producteur de produits non structuraux.
 - 1.2.1. Pour les bâtiments.
 - 1.2.1.1. Producteur de produits d'apparence (intérieur, extérieur).
 - 1.2.1.2. Producteur de meubles
 - 1.2.1.3. Producteur de produits intermédiaires.
 - 1.2.2. Pour le transport terrestre
 - 1.3. Concepteur de produits
 - 1.3.1. Concepteurs industriels
 - 1.3.2. Concepteurs de produits d'ingénierie
 - 1.3.3. Architectes

COLLECTE DE DONNÉES

La collecte de données sera réalisée à travers des entrevues semi-dirigées à question ouverte. On va expliquer à l'interviewé : la durée de l'entrevue; si c'est possible d'enregistrer l'entretien; les objectifs de l'entretien; le caractère volontaire de l'entrevue et la garantie de confidentialité des résultats de l'entrevue. Avant de commencer l'entrevue, on donnera au participant le formulaire de consentement pour sa signature.

QUESTIONNAIRE

Nom : _____

Poste de travail : _____

Nom de l'entreprise : _____

1.1 Est-ce que vous pouvez me parler de votre formation professionnelle et de votre expérience de travail dans cette entreprise?

1.2 Quelle est la nature de vos produits et comment se situe votre entreprise dans le marché?

1.3 Quel est votre degré d'implication et/ou votre influence dans le processus de développement de produits dans l'entreprise?

Des échantillons du matériau composite et une feuille expliquant les propriétés physiques et mécaniques du matériau seront présentées à cette étape.

1.4 D'après les échantillons et les données présentées, que pensez-vous des propriétés physiques et mécaniques de chacun des composites? Voyez-vous des avantages ou des désavantages pour ces matériaux composites?

1.5 Pour le développement d'un produit composite, dans votre domaine, quelles caractéristiques sont à considérer? (dimensions, acoustique, thermique, vibration, résistance au feu, mécanique, nature des matériaux utilisés, les codes, l'apparence, etc.)?

1.6 Quelle serait l'application la plus réaliste pour chacun de ces matériaux composites à votre avis? Est-ce que ces matériaux s'intègrent dans votre production? Si oui, pour quelle fonction?

1.7 À votre avis, s'il y avait un aspect à modifier pour rendre ces panneaux plus intéressants, lequel serait-il? Avez-vous d'autres idées ou des suggestions pour l'utilisation d'un matériau bois-aluminium dans votre entreprise ou ailleurs?

1.8 Commentez sur les aspects économiques dans l'utilisation de ces matériaux dans votre production (coûts de production, qualité/prix) ?

1.9 Quelle serait la fourchette de prix dans laquelle devraient se situer les matériaux présentés pour les applications de 1.6?

1.10 Est-ce que vous croyez que la combinaison de l'aluminium et du bois est un avantage ou un désavantage environnemental dans un matériau composite?

Annexe A-3 : Formulaire de consentement - entrevue

Présentation de la chercheure responsable du projet

Cette recherche est réalisée dans le cadre du projet de doctorat de Franz Segovia, sous la responsabilité de M Pierre Blanchet, professeur agrégé au département de sciences du bois et de la forêt de l'Université Laval.

Avant d'accepter de participer à ce projet de recherche, veuillez prendre le temps de lire et de comprendre les renseignements qui suivent. Ce document vous explique le but du projet de recherche et ses procédures. Vous pouvez poser des questions sur le projet de recherche à la personne qui vous présente ce document.

Nature de l'étude

L'objectif général du projet de recherche consiste au développement d'un matériau composite à base de bois laminé avec alliage d'aluminium. L'entrevue que vous vous apprêtez à réaliser nous permettant d'identifier des applications potentielles pour les matériaux composites à base du bois développés et présentés.

Déroulement de la participation

Votre participation consiste à participer à l'entrevue, d'une durée d'environ 45 - 60 minutes, qui portera sur les éléments suivants:

- Avantages et inconvénients des quatre types de matériau composite à base de bois développés et présentés, qui vous seront présentés par l'intervieweur.
- Les applications potentielles des quatre types de matériau composite à base de bois développés et présentés, qui vous seront présentés par l'intervieweur.

Participation volontaire et droit de retrait

Vous êtes libre de participer à ce projet de recherche. Vous pouvez aussi mettre fin à votre participation sans conséquences négatives ou sans avoir à justifier votre décision. Il n'y a aucun risque à participer au projet. Si vous décidez de mettre fin à votre participation, il est important d'en prévenir le chercheur dont les coordonnées sont incluses dans ce document. Tous les renseignements personnels vous concernant seront alors détruits.

Confidentialité et gestion des données

Les mesures suivantes seront appliquées pour assurer la confidentialité des renseignements fournis par les participants :

- Les noms des participants ne paraîtront dans aucun rapport;
- Les questionnaires seront codifiés afin de protéger l'identité des participants;
- Les résultats individuels des participants ne seront jamais communiqués;
- Seules les informations globales et dépersonnalisées et les résultats d'analyse seront publiés;
- Les résultats seront publiés dans des revues scientifiques

Les matériels et les données générés de la recherche seront détruits deux ans après la fin du projet (décembre 2017).

Renseignements supplémentaires

Si vous avez des questions sur la recherche ou les implications de votre participation, veuillez communiquer avec une des deux personnes suivantes :

Franz Segovia Abanto, étudiant au Doctorat
Téléphone : (418) 656-2131 poste 12561
Courriel : franz.segovia-abanto.1@ulaval.ca

Pierre Blanchet, PhD, professeur
Téléphone : (418) 656-7954
Courriel : pierre.blanchet@sbf.ulaval.ca

Votre collaboration est précieuse pour la réalisation de cette recherche et nous vous remercions de votre participation!

Je soussigné(e) _____ consens librement à participer à la recherche intitulée « Développement d'un matériau composite à base de bois laminé avec alliage d'aluminium ». J'ai pris connaissance du formulaire de consentement et j'ai compris le but et la nature du projet de recherche.

Signature du participant, de la participante

Date: _____

Nous pourrions diffuser les résultats de la recherche au courant de l'année 2015-2016. Si vous souhaitez en recevoir un résumé, veuillez nous fournir votre adresse courriel :

_____ Si votre courriel devait changer d'ici la diffusion des résultats, veuillez-nous en faire part.

J'ai expliqué le but et la nature du projet de recherche au participant. J'ai répondu au meilleur de mes connaissances aux questions posées et j'ai vérifié la compréhension du participant.

Signature du chercheur / étudiante désignée

Date: _____

Plaintes ou critiques

Toute plainte ou critique sur ce projet de recherche pourra être adressée au Bureau de l'Ombudsman de l'Université Laval :

Pavillon Alphonse-Desjardins, bureau 3320
2325, rue de l'université
Université Laval
Québec (Québec) G1V 0A6
Renseignements – Secrétariat: (418) 656-3081
Ligne sans frais : 1-866-323-2271
Courriel : info@ombudsman.ulaval.ca

Annexe B-1 : Poster présentée dans la conférence SWST 2014 (Chapitre 4)

Aluminum-laminated Wood Composites: Manufacturing Parameter Optimization

Franz Segovia¹, Pierre Blanchet¹, Costel Barbuta², Robert Beaugrand¹

¹Wood Research Centre, Department of Wood and Forest Sciences – Laval University, ²FPInnovations

Introduction

Wood-based composites are used for a number of structural and non-structural applications. Plywood and oriented strand board (OSB) are used as structural panels for construction and industrial applications. Medium density fiberboard (MDF) is used as an interior wood composite substrate in the manufacture of cabinets and other furniture. Wood-based composites offer good mechanical properties for their main applications, but some weaknesses such as poor water resistance, dimensional stability and durability limit their use in applications involving exposure to wet environment conditions. Several studies reported that wood-based composites laminated with fiberglass or wood veneer sheets tend to show an increase in physical properties (thickness swelling, water absorption). Reinforcing materials such as fiberglass, wood veneer sheets or densified wood veneer sheets compressed yielded even greater increases in mechanical properties (modulus of elasticity, MOE, and modulus of rupture, MOR). The resulting composite sandwich (laminated panel) lends itself to wider utilization where strength, stiffness, dimensional stability and weight efficiency are required. The adhesive type, pressing conditions (specific pressure, temperature and time) and the structural characteristics of the lamination material are among the factors that need to be considered for core-to-face bonding to be optimized. The objective of the study was to determine the optimal specific pressure, as one key manufacturing parameter, and to assess the performance of three wood-based composites as a core layer in laminated panels.

Material and methods

Materials. Three types of wood-based composite panels were used as cores (Table 1). The laminating material consisted of aluminum alloy sheets (Alloy-3003) having a thickness of 0.6mm. A liquid polyurethane adhesive (Macroplast UR-8346) provided by Henkel Canada Corporation was used for bonding.

Table 1: Physical properties of the wood-based composites

Wood-based composites	Symbol	^a Moisture content (%)	Thickness (mm)	^a Density (kg/m ³)
High-density fiberboard	HDF	6	9,742	822
Medium-density fiberboard	MDF	7	9,742	798
Oriented strand board	OSB	8	9,742	673

^aMoisture content was determined using ASTM Standard D4447-07 (Method A-Chlor-Drying), while density was determined according to ASTM Standard D2395-07 (Test Method A- volume by measurement).

Determination of physical and mechanical properties. The thickness swelling, water absorption, bending and internal bond tests were conducted according to ASTM Standard D1037.06a (ASTM International 2012), while the tensile strength perpendicular to the surface was measured according to EN 311:2002 Standard (Wood-based panels-Surface soundness-Test method). Non-laminated wood-based composite specimens were included in the tests for comparison purposes.

Results and discussion (Physical and mechanical properties)

Wood-based Composite	Process	Pressing pressure (kPa)	Thickness swelling (%)		Water absorption (%)	
			2-h	24-h	2-h	24-h
HDF	w/o lamination ^a	---	2.95 (0.34) ^b	9.30 (0.21)	3.64 (0.09)	14.04 (0.63)
	Laminated	138	0.27 (0.03)	0.41 (0.03)	0.33 (0.12)	2.45 (0.23)
	Laminated	414	0.21 (0.17)	0.41 (0.02)	0.12 (0.05)	2.43 (0.13)
	Laminated	689	---	0.38 (0.14)	0.45 (0.02)	1.65 (0.08)
MDF	w/o lamination	---	3.17 (0.09)	14.25 (0.25)	4.59 (0.01)	22.05 (0.18)
	Laminated	138	0.10 (0.05)	1.15 (0.03)	5.22 (3.18)	16.33 (2.50)
	Laminated	414	0.29 (0.27)	13.94 (0.58)	1.57 (0.48)	17.77 (0.64)
	Laminated	689	1.05 (0.65)	16.17 (2.57)	2.74 (0.91)	19.70 (2.42)
OSB	w/o lamination	---	3.88 (0.81)	14.81 (1.50)	10.23 (0.42)	35.28 (1.22)
	Laminated	138	0.35 (0.04)	4.54 (2.08)	2.65 (0.48)	14.71 (4.89)
	Laminated	414	0.39 (0.15)	2.21 (0.15)	2.94 (1.57)	11.09 (1.05)
	Laminated	689	0.81 (0.39)	2.46 (0.90)	2.46 (0.99)	11.37 (1.06)

Table 2. WA and TS average values of aluminum laminated wood-based composites pressed at 138 kPa, 414 kPa and 689 kPa.

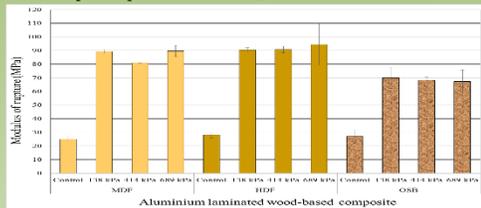


Figure 2. Effects of pressing at 138 kPa, 414 kPa and 689 kPa on MOR in laminated panels.

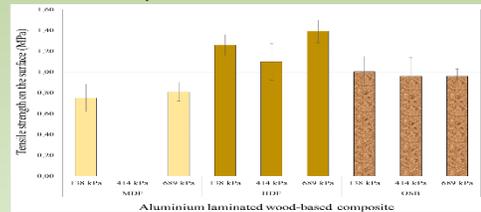
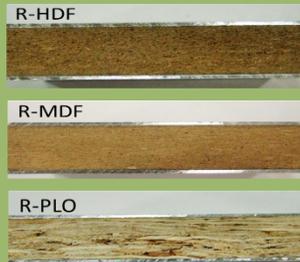


Figure 4. Tensile strength perpendicular to the surface of laminated panels pressed at 138 kPa, 414 kPa and 689 kPa.



Panel lamination.

The wood-based composites and aluminum alloy sheets were sanded with 120- and 150-grit sandpaper respectively. The laminated panels with two aluminum alloy faces were compressed in the laboratory hot press at three pressure levels, i.e.: 138 kPa, 414 kPa 689 kPa at 120°C for 6 minutes.

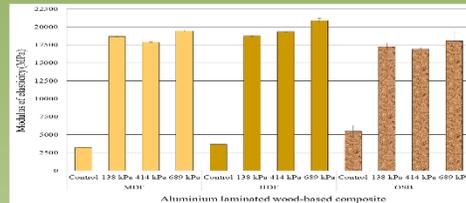


Figure 1. Effects of pressing at 138 kPa, 414 kPa and 689 kPa on MOE in the laminated panels

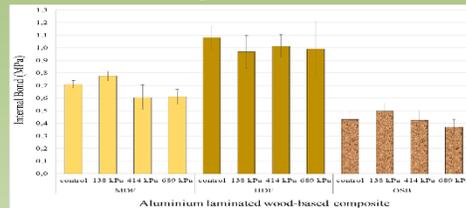


Figure 3. IB strength values of laminated panels pressed at 138 kPa, 414 kPa and 689 kPa.

Conclusions

- Thickness swelling (TS) and water absorption (WA) were clearly reduced as a result of the barrier to water penetration provided by the aluminum alloy sheets.
- The laminated panels exhibited significantly greater modulus of elasticity (MOE) and modulus of rupture (MOR) values than the equivalent wood-based composites without lamination.
- With a lower pressure (138 kPa), no such IB reduction was observed, and the laminated HDF panels were not affected, whatever the pressing pressure.