

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC EN ABITIBI-TÉMISCAMINGUE

CONCEPTION DE COMPOSITES BOIS-POLYMÈRE HYBRIDES
STRUCTURAUX

MÉMOIRE

PRÉSENTÉ

COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN INGÉNIERIE

PAR

HE WANG

OCTOBRE 2019



BIBLIOTHÈQUE

Cégep de l'Abitibi-Témiscamingue
Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue

Mise en garde

La bibliothèque du Cégep de l'Abitibi-Témiscamingue et de l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue a obtenu l'autorisation de l'auteur de ce document afin de diffuser, dans un but non lucratif, une copie de son œuvre dans Depositum, site d'archives numériques, gratuit et accessible à tous.

L'auteur conserve néanmoins ses droits de propriété intellectuelle, dont son droit d'auteur, sur cette œuvre. Il est donc interdit de reproduire ou de publier en totalité ou en partie ce document sans l'autorisation de l'auteur.

Warning

The library of the Cégep de l'Abitibi-Témiscamingue and the Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue obtained the permission of the author to use a copy of this document for non-profit purposes in order to put it in the open archives Depositum, which is free and accessible to all.

The author retains ownership of the copyright on this document. Neither the whole document, nor substantial extracts from it, may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

REMERCIEMENTS

Août 2017 – Octobre 2019

Il m'est impossible d'expliquer l'ampleur d'exaltation mon séjour dans la région de l'Abitibi-Témiscamingue. C'est une aventure inoubliable que je me souviendrai de toute ma vie. Je n'imaginerais qu'il s'assagissait qu'une série d'expériences incroyables depuis mon arrivée dans la région. Je n'aurais pas découvert la région de l'Abitibi-Témiscamingue sans l'aide de l'Agente d'Immigration Mme Annick Dostaler et l'activité de PAJ (Place aux Jeunes en Région).

Dr. Sébastien Migneault (codirecteur), Prof. François Godard (codirecteur) et Prof. Ahmed Koubaa (directeur de recherche) sont venus au bon moment pour m'encadrer dans l'équipe de recherche de l'IRF (Institut de recherches sur les forêts). Je voudrais vous exprimer, vous témoigner toute ma gratitude pour vos aides durant mes études. Les opportunités vous m'avez offertes, tels que la participation aux colloques de recherche, la participation aux projets de recherche et ainsi que les visites industrielles m'ont permis de développer mes compétences. En tant qu'auxiliaire de recherche, j'ai eu le plaisir à participer aux projets de recherche de Flavia Braghiroli et Leandro Passarini. Grâce à votre support, j'ai conservé ma motivation en recherche. Je retiendrai également l'accompagnement de tous les membres de l'IRF.

Je souligne l'apport important de messieurs William Belhadeff, Jessé Aumond-Beaupré, Jingfa Zhang, Gilles Villeneuve et madame Besma Bouslimi qui m'ont beaucoup aidé

pour ma recherche, notamment pour les démonstrations d'utilisation d'équipements. Je me souviendrai particulièrement la compagnie de XiangBo Yin et DongYu Lyu. La pertinence de sa contribution sur le traitement de données statistique aura assurément une grande contribution à mon mémoire.

Je réserve une mention spéciale au Professeure Nicole Robert qui m'a beaucoup aidé durant toute ma formation, notamment son aide en probabilité et statistique, en logiciel de simulation et son aide et ses conseils pour ma compétition CQI (Compétition Québécoise d'ingénierie 2019) de cycles supérieures en janvier 2019.

AVANT-PROPOS

Ce document est présenté sous la forme d'un mémoire de structure classique. Il a été conçu en suivant les critères de présentation adoptés par le comité du programme de cycle supérieur de l'École de génie de l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue. Mon mémoire contient l'introduction générale, la revue de la littérature (Chapitre I), l'approche méthodologique (Chapitre II), les résultats et la discussion (Chapitre III) et ainsi que la conclusion générale. Dans cet ouvrage, on retrouve deux problématiques à résoudre pour la conception de composites bois-polymères structuraux : l'adhésion du CBP avec d'autres matériaux tel que l'aluminium et le renforcement des propriétés mécaniques en flexion et en traction du CBP.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENT	II
AVANT-PROPOS	IV
TABLE DES MATIÈRES	V
LISTE DES FIGURES	X
LISTE DES TABLEAUX	XIII
LISTE DES ABRÉVIATIONS	XIV
RÉSUMÉ	XVI
ABSTRACT	XVII
INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
CHAPITRE I	4
REVUE DE LITTÉRATURE	4
1.1 Les composites bois polymères (CBPs)	4
1.2 Les propriétés mécaniques des CBPs	4
1.2.1 Les facteurs qui influencent les propriétés mécaniques d'un CBP	4
1.2.2 Caractérisation mécanique du CBP	6
1.2.3 Renforcement des propriétés mécaniques du CBP	9
1.3 L'adhésion du CBP	13

1.3.1 Les techniques de l'assemblage.....	13
1.3.2 Le choix d'adhésif	14
1.3.3 Les traitements de surface du CBP	16
1.3.4 La rugosité	18
CHAPITRE II	25
APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE.....	25
2.1 Objectifs et hypothèses de recherche	25
2.2 Matériels.....	27
2.3 Production et caractérisation des CBP	28
2.3.1 Procédé de production du CBP.....	28
2.3.2 Les traitements de surface	29
2.3.2.1 Le traitement de surface par voie mécanique	29
2.3.2.2 Le traitement de surface par voie chimique.....	30
2.3.2.3 Mesure des paramètres de rugosité surfacique	31
2.3.2.4 L'adhésion du CBP avec l'aluminium.....	32
2.3.3 L'analyse de surface	34
2.3.3.1 L'analyse de surface par solution de fluorescence	34

2.3.3.2 L'analyse de surface par spectroscopie infrarouge (FTIR)	35
2.4 Méthodologie pour établir le lien entre la rugosité et l'adhésion	35
2.4.1 L'analyse de variance à un facteur (one-way ANOVA)	36
2.4.2 Comparaison multiple.....	39
2.4.3 Analyse de composantes principales (PCA).....	39
2.4.4 Analyse de régression.....	39
2.5 Renforcement du CBP	40
2.5.1 Intégration de fibres de carbone	40
2.5.2 Renforcement du CBP en préparant des composites hybride.....	42
2.5.3 Caractérisation des propriétés mécaniques.....	42
CHAPITRE III.....	44
RÉSULTATS ET DISCUSSION	44
3.1 La composition de la surface du CBP.....	44
3.2 Les paramètres de rugosité surfacique	47
3.3 Les résultats d'adhésion.....	50
3.3.1 Analyse de substrat après la rupture	50
3.3.2 Les résultats d'adhésion.....	52

3.3.3 La relation entre la rugosité et l'adhésion.....	53
3.3.3.1 L'analyse de variance à un facteur (one-way ANOVA)	54
3.3.3.2 Comparaison multiple.....	56
3.4 Renforcement du CBP par fibres de carbone	63
3.4.1 La morphologie des CBPs renforcés par des fibres de carbone	63
3.4.2 Renforcement par l'ajout d'une couche d'aluminium	68
3.4.3 Analyse du coût de production	72
CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES.....	76
4.1 Conclusions.....	76
4.2 Perspectives.....	78
ANNEXES.....	80
ANNEXE I.....	81
ANNEXE II.....	84
ANNEXE III.....	86
ANNEXE IV.....	90
ANNEXE V.....	92
ANNEXE VI.....	94

ANNEXE VII	97
RÉFÉRENCES	100

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 La courbe de contrainte-déformation en traction des CBPs. (Migneault et al., 2014)	5
Figure 1.2 L'essai de flexion à trois points et la répartition des contraintes. (Baïlon & Dorlot, 2000).....	8
Figure 1.3 CBP renforcé par une couche de fibres de verre. (Mongkollapkit et al., 2010)	12
Figure 1.4 La distribution des contraintes de flexion : A) CBP; B) CBP-LLDPE-CBP; (Hao et al., 2018)	13
Figure 1.5 La répartition des forces des techniques d'assemblage; a) soudure b) rivetage c) collage. (Bridier, 2016).....	14
Figure 1.6 La synthèse de DGEBA pour une condition basique. (Bruneaux, 2004) ..	15
Figure 2.1 La structure chimique du MAPP. (Harper & Wolcott, 2006).....	27
Figure 2.2 Les principales étapes de production des CBP.	28
Figure 2.3 Le banc de ponçage.	30
Figure 2.4 Le traitement de surface par composés chromiques.	31
Figure 2.5 Le microscope confocal 3D LaserVKX X150.....	32
Figure 2.6 Le mode de fixation de composite sandwich CBP-Al-CBP.....	33

Figure 2.7 Le test d'adhésion du composite sandwich CBP-Al-CBP.....	34
Figure 2.8 Le montage des essais mécaniques : A) L'essai de flexion à trois points; B) L'essai de traction;.....	43
Figure 3.1 La surface d'un CBP (50%) : A) - Sans traitement; B) - Après traitement chimique; C) -Après abrasion #180;.....	45
Figure 3.2 Le spectre IR de différentes surfaces.....	46
Figure 3.3 La surface de CBP non oxydée (à gauche) et oxydée (à droite).....	47
Figure 3.4 L'aspect texture de surface : A) Al ($Str \approx 0$); B) CBP (50% fibres) ($Str \approx 0,6$);	49
Figure 3.5 La surface d'adhésif avec pores d'air en 3D (10x).....	51
Figure 3.6 L'interface entre l'époxy et le CBP (50%) : A) – CBP sans traitement; B) – CBP traité par abrasion;.....	52
Figure 3.7 Le digramme Quantile-Quantile de la rugosité arithmétique (S_a).....	55
Figure 3.8 Boîtes à moustaches pour les paramètres de rugosité : A) La rugosité arithmétique (S_a); B) La rugosité quadratique (S_q);.....	57
Figure 3.9 La boîte à moustache du facteur de Wenzel.	58
Figure 3.10 Diagramme de l'analyse en composantes principales entre les paramètres de rugosité et la force d'adhésion.	60
Figure 3.11 Comparaison des forces mesurées et des forces prédites par modèle de régression.	62

Figure 3.12 La surface d'un CBP renforcée par des fibres de carbone. (50x).....	63
Figure 3.13 La comparaison multiple de la rugosité arithmétique des surfaces de CBP par le test LSD de Tukey.	64
Figure 3.14 Les résistances mécaniques de CBP renforcés par des fibres de carbone.	65
Figure 3.15 Le triangle de développement d'un produit CBP renforcé.....	73

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 Les propriétés de diverses fibres de renforcement de différentes catégories. (Amiotte, 2011).....	10
Tableau 1.2 Les traitements de surface des CBPs (Kraus et al., 2015).....	17
Tableau 1.3 Comparaison des méthodes de mesures de la rugosité surfacique. (Kenyence, 2019).....	20
Tableau 3.1. Paramètres de rugosité surfacique des surfaces selon la norme ISO 25178.	48
Tableau 3.2 Les résultats des tests d'adhésion.....	53
Tableau 3.3. Résultats des analyses de variance. (k=6, n=42, $\alpha=0,05$)	56
Tableau 3.4 Les moyennes des paramètres de rugosités et la force d'adhésion.	59
Tableau 3.5 Les résultats de la sélection de modèles basés sur l'AIC.....	61
Tableau 3.6 Les propriétés de flexion des composites sandwich CBP-Al-CBP.....	69
Tableau 3.7 Les propriétés de traction des composites sandwich CBP-Al-CBP.....	70
Tableau 3.8 Les prix de matières premières et des CBPs renforcés.	74

LISTE DES ABRÉVIATIONS

CBP	Composite bois-polymère
F	Rapport de F-statistique
f_{ACF}	Fonction d'autocorrélation
FTIR	Spectroscopie Infrarouge à transformée de Fourier
HR	Humidité relative
MC	Teneur en humidité
PEHD	Polyéthylène à haut densité
R	Facteur de Wenzel
Ra	Hauteur moyenne arithmétique pour rugosité linéique
Rz	Hauteur maximale arithmétique pour rugosité linéique
Sa	Hauteur moyenne arithmétique pour rugosité surfacique
Sq	Moyenne quadratique hauteur pour rugosité surfacique
Ssk	Asymétrie pour rugosité surfacique
Sku	Aplatissement pour rugosité surfacique

Str	Rapport d'aspect de texture pour rugosité surfacique
Sdr	Rapport de surface interfaciale développée pour rugosité surfacique
Sϕ	Paramètres d'amplitude pour rugosité surfacique
\bar{X}	Moyenne d'une série des échantillons
s	Écart-type d'une série des échantillons
v	Coefficient de variance d'une série des échantillons

RÉSUMÉ

Les composites à base de fibres de bois et de polymères thermoplastiques (CBP) ont des propriétés mécaniques faibles ce qui empêche leur utilisation pour des applications structurales. La conception de composites hybrides par l'ajout d'un renfort ou d'autres types de fibres est parmi les alternatives pour améliorer les performances mécaniques de ces composites. Dans ce contexte, nous avons examiné différentes approches pour la conception de composites hybrides soit l'ajout d'une faible proportion de fibres de carbone et la fabrication d'un composite stratifié en utilisant un renfort en aluminium. L'ajout d'une faible proportions de fibres de carbone (3, 6, 9%) au CBP à base de fibres d'érable avec une matrice de polypropylène (PP) recyclé a augmenté significativement ses propriétés mécaniques. À titre d'exemple, l'ajout de 9% de fibres de carbone a augmenté les modules d'élasticité en flexion et en traction de 121% et de 140%, respectivement. De la même façon, les contraintes maximales en flexion et en traction ont augmenté de 95% et de 54%, respectivement.

Par ailleurs, la fabrication de composites hybrides stratifiés en utilisant un renfort en aluminium pour des fins représente plusieurs défis notamment en terme d'adhésion entre le CBP et l'aluminium. Un adhésif époxy a été employée. Pour améliorer l'adhésion interfaciale, deux traitements de surface (l'abrasion unidirectionnel et le traitement par composés chromiques) et le pressage à chaud ont été utilisés. Cette approche présente plusieurs défis dont le plus important est d'établir la relation entre les paramètres de rugosité surfacique et la résistance d'adhésion. Les paramètres de rugosité surfacique de différentes surfaces ont été étudiés par microscope confocal et modélisés par le logiciel VK-X. La rugosité arithmétique (S_a), la rugosité quadratique (S_q), l'aplatissement (S_{ku}), l'asymétrie (S_{sk}), le rapport d'aspect de texture (S_{tr}) et le rapport de surface interfaciale développée (S_{dr}) sont des paramètres de rugosité surfacique obtenus par modélisation. Les traitements de surface améliorent l'adhésion du CBP avec l'aluminium. Les résultats des travaux montrent que les paramètres d'amplitude (S_a , S_q) et le paramètre d'aire (S_{dr}) de rugosité surfacique ont des impacts sur l'adhésion de l'aluminium.

Mots-clés: Composite bois-polymère (CBP), traitements de surface, paramètres de rugosité surfacique, adhésion de CBP, renforcement de CBP.

ABSTRACT

Wood Plastic Composites (WPC) based on thermoplastic polymers have low flexural and low tensile properties which prevent their use for structural applications. The design of hybrid composites by the addition of a reinforcement or other types of fibers is among the alternatives to improve the mechanical performance of these composites. In this context, we examined two approaches to the design of hybrid composites: the addition of a small proportion of carbon fibers and the fabrication of a laminated composite using an aluminum layer as reinforcement. The addition of a small proportion of carbon fibers (3, 6, 9%) to WPC based on maple fibers with a recycled polypropylene (PP) matrix significantly increased the mechanical properties. The addition of low levels of carbon fiber substantially improved the mechanical properties of WPC. For example, the addition of 9% of carbon fiber improved the both flexural and tensile modulus of elasticity in bending and pulling by 121% and 140%, respectively. In the similarly way, the maximum tensile bending stress increased by 95% and 54%, respectively. In addition, the production of laminated hybrid composite by using an aluminum plate represents several challenges, particularly in terms of adhesion between the WPC and the aluminum. An epoxy adhesive was used to improve interfacial adhesion, various surface treatments (such as unidirectional abrasion, treatment with chromic compounds) and hot pressing were used. This approach presents several challenges. The most important of that is to establish the relationship between surface roughness parameters and adhesion strength. The surface roughness parameters of different surfaces were studied by confocal microscope and modeled by the VK-X software. Hence, the arithmetic roughness (S_a), the quadratic roughness (S_q), the flattening (S_{ku}), the asymmetry (S_{sk}), the texture aspect ratio (S_{tr}) and the developed interfacial surface ratio (S_{dr}) were obtained by modeling. Surface treatments improve CBP's adhesion to aluminum. The results of the work show the impact of the parameters of amplitude (S_a , S_q) and the area parameter (S_{dr}) of surface roughness on the adhesion of aluminum.

Keywords: Wood-polymer composite (WPC), surface treatments, surface roughness parameters, WPC adhesion, WPC reinforcement.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Contexte de l'étude

Pour augmenter l'efficacité de transformation du bois, de nouvelles technologies (optimiseur ébouteuse, optimiseur déligneuse, scanner en photo-cellule, scanner infrarouge, caméra 3D, etc.) et des méthodes («Look up table», la courbe du sciage, le contrôle de procédé avec correction en continue, etc.) sont impliquées dans les principales étapes du procédé de sciage (l'écorçage, les débitages primaire et secondaire, le délignage, l'éboutage). Cependant, le taux de perte de bois sous forme de copeaux ou de sciures (farine du bois) peut atteindre jusqu'à 60%. Ces résidus de sciage peuvent être valorisés comme des produits secondaires de sciage pour la production de pâte et papier, la production d'énergie et la production de matériaux composites. Malheureusement, ces dernières années, le marché de résidus de sciage est dans une situation précaire : la demande de copeaux de bois par l'industrie des pâtes et papiers pour la production de produits imprimés est en déclin. La chute du prix des résidus de sciage est remarquable. Actuellement, le prix des résidus de sciage est inférieur à 120 \$ US / TMA (TMA : tonne métrique anhydre).

Sans contredit, la valorisation des résidus de sciage est une exigence pour l'industrie forestière. De plus en plus, les entreprises forestières fixent leur regard sur les nouveaux produits qui valorisent les résidus de sciage pour une variété de matériaux renouvelables, tel que les CBPs. Le marché de CPBs est en forte croissance vers la fin du 20^{ième} siècle (1995 +). En 2017, le marché du CBP était estimé à 4,351 milliards \$ US (Research and Markets, 2017).

Les CBPs contiennent une partie de farines du bois (20%-80% en poids) et de matières plastiques. Une faible quantité d'agent de couplage est ajouté pour associer ces deux parties. De nos jours, la notion d'écologie attire de plus en plus l'attention du public. Selon Recyc-Québec (Québec, 2013), 240 588 tonnes de plastique ont été produites par les ménages québécois, seulement 31,52% (75 840 tonnes) ont été recyclées. La production de plastique et le taux de recyclage de plastique peuvent augmenter dans le futur (Jacob-Vaillancourt & Galvez, 2017). La production de CBP en utilisant ces plastiques recyclés sera un volet incontournable de toute stratégie d'économie circulaire, qui vise à allonger au maximum le cycle de vie du plastique.

Ces dernières années, la demande pour les CBPs est en forte croissance non seulement dans les marchés traditionnels comme les planches de terrasses, les plafonds mais dans de nouveaux marchés comme les revêtements extérieurs, les éléments d'infrastructure en ingénierie civile, les pièces d'automobile, etc. (Mongkollapkit et al., 2010). Par exemple, les applications de CBPs dans la voiture de Mercedes Benz A class. Le panneau de porte est un CBP de fibres de lin / sisal / bois avec matrice résine de PU (Polyuréthane) / Époxy. Le panneau de coffre est un CBP de fibres de coton avec matrice de PP / Polytéréphtalate d'éthylène (PET) (Wallenberger & Weston, 2003). Le panneau de plancher est un CBP de PP- NMT (N-méthyltryptamine) W168 (Wallenberger & Weston, 2003). L'utilisation des CBP à grande échelle dans l'industrie de construction peut donc profiter à l'ensemble de notre société.

Problématique de l'étude

La majorité des plastiques à recycler sont des résines thermoplastiques de type polyoléfines semi-cristallines (Polypropylène, Polyéthylène haute densité, Polyéthylène basse densité, polyméthylpentène, etc.). Les applications de polypropylène (PP) sont répandues dans l'industrie alimentaires et dans l'industrie automobile, par exemple on peut trouver des pare-chocs, les tableaux de bord, des contenant de yogourt, des bouteilles d'eau, des emballages alimentaires en PP, etc. La formule chimique du polypropylène s'écrit comme suit $(-CH_2-CH(CH_3)-)_n$, obtenu par la polymérisation du propylène C_3H_6 en utilisant une faible quantité de copolymère comme l'éthylène et le propène (Godin, 2013). Le PP est résistant aux acides et aux graisses et il est plus rigide que d'autres types de thermoplastiques polyoléfines. Donc, parmi les thermoplastiques, le PP est plus susceptible d'être utilisé pour la fabrication de CBPs structuraux. Cependant, la température de transition vitreuse de PP est assez élevée ($-10\text{ }^\circ\text{C}$), les applications de CBPs ayant une matrice de PP sont limitées en régions froides.

Cependant, on trouve que les propriétés mécaniques des CBPs à base de PP sont faibles. Les CBPs à base de PP nécessitent un renforcement des propriétés mécaniques pour qu'ils puissent être classifiés comme des matériaux structuraux. L'ajout de fibres de verre, de fibres de carbones, des nanoparticules ou d'une couche de métal permet de renforcer les propriétés de CBPs.

Étant un matériau apolaire, les CBPs avec matrice de PP, sont extrêmement difficiles à assembler avec d'autres matériaux comme l'aluminium. Un autre défi vise à améliorer l'adhésion du CBP en changeant la morphologie et la polarité de surface par traitement de surface.

CHAPITRE I

REVUE DE LITTÉRATURE

1.1 Les composites bois polymères (CBPs)

Les CBPs sont des nouveaux matériaux biosourcés, ils possèdent des caractéristiques spécifiques. Actuellement, les divers produits de CBP disponibles sur le marché sont constitués de trois éléments principaux. Le premier élément est appelé charge, l'agent de renfort ou la matière de remplissage, selon l'objectif de production du CBP. En général, les charges des CBPs sont des matériaux lignocellulosiques, tels que les fibres de bois, les fibres papetières dont les fibres Kraft, les particules de cellulose, de biochar, etc. (Bengtsson et al., 2007; Das et al., 2015; Oksman, 1996). Le deuxième élément est la matrice du composite. Dans le cas des CBPs, les résines thermoplastiques sont généralement utilisées comme matrice. Comme troisième élément, une faible quantité d'agents de couplage est utilisée pour associer les deux parties du CBP. La charge, la résine thermoplastique et l'agent de couplage sont mélangés, les CBPs sont obtenus par extrusion, thermoconsolidation ou par moulage par injection.

1.2 Les propriétés mécaniques des CBPs

1.2.1 Les facteurs qui influencent les propriétés mécaniques d'un CBP

Les propriétés mécaniques d'un CBP dépendent de plusieurs facteurs tels que le pourcentage de fibres, l'espèce et l'origine des fibres, la taille des fibres, le procédé de

production du CBP, etc. Migneault et al. (2014) ont évalué les propriétés mécaniques des CBPs ayant différentes proportions de fibres. Ils ont testé les propriétés mécaniques des CBPs contenant 10%, 20%, 30% et 40% de fibres de peuplier faux-tremble. La déformation à la rupture du polyéthylène haute densité (PEHD) était supérieure à 10%, l'ajout de fibres de bois dans le HDPE a diminué la déformation à la rupture des CBPs. La figure 1.1 montre la courbe de contrainte-déformation des CBPs en traction du PEHD pur et renforcé avec différentes proportions de fibres.

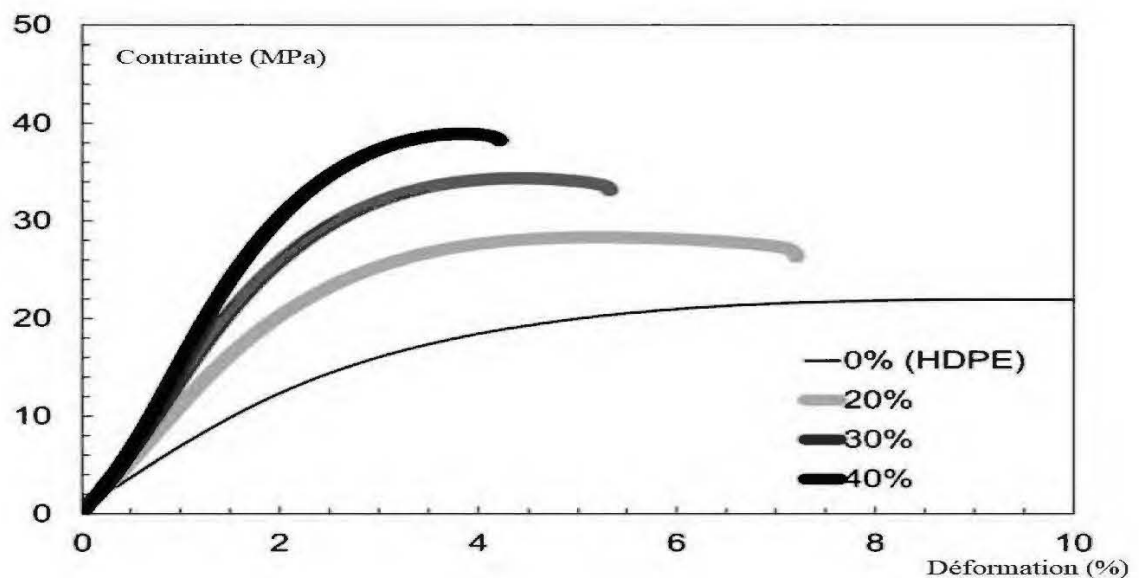


Figure 1.1 La courbe de contrainte-déformation en traction des CBPs. (Migneault et al., 2014)

Bouaffif et al. (2009) ont démontré que l'espèce et l'origine des fibres ont des impacts sur les propriétés mécaniques des CBPs. Les propriétés mécaniques des CBPs ayant une matrice de HDPE, une teneur en fibres de 35%, une dimension de 35 à 42 mesh et issues de différentes espèces ont été testées. Par exemple, le CBP fabriqué utilisant des fibres de cèdre provenant du bois de cœur possédait une résistance à la flexion de l'ordre de 32 MPa et une résistance à la traction d'environ 24 MPa. Le CBP fabriqué à partir de fibres d'écorce de cèdre démontrait des propriétés légèrement inférieures à

celles d'un CBP fabriqué avec des fibres de cèdre provenant du bois de cœur, avec 27 MPa comme résistance à la flexion et 22 MPa comme résistance à la traction. Le CBP fabriqué utilisant les fibres d'épinette avait une résistance à la flexion de l'ordre de 42 MPa et une résistance à la traction de 28 MPa. En comparaison avec les CBPs produits avec des fibres de cèdre, les fibres d'épinette améliorent les propriétés mécaniques des CBPs à cause de leur composition chimique. En général, les fibres de bois qui possèdent un ratio de O/C (oxygène / carbone) et un taux de cristallinité plus élevés donnent des meilleures propriétés mécaniques aux CBPs.

Shebani et al. (2009) ont observé une meilleure interaction entre la matrice et les fibres de bois qui augmente les propriétés mécaniques des CBPs. Gacitua et Wolcott. (2009) ont observé l'intégration des fibres de bois dans la matrice des CBPs. Ils ont expliqué qu'une meilleure adhésion ou intégration des fibres dans la matrice d'un CBP facilite le transfert de contrainte. Par conséquent, la rupture entre les renforts et la matrice de CBP est plus difficile, donc les propriétés mécaniques sont supérieures. (Gacitúa & Wolcott, 2009)

1.2.2 Caractérisation mécanique du CBP

Les tests de caractérisation mécanique statique tels que la flexion à trois points et la traction sont généralement mesurés pour les CBPs.

1.2.2.1 L'essai de flexion à trois points

L'essai de flexion à trois points est un test couramment utilisé ayant pour objectif de déterminer la contrainte de rupture (résistance maximale à la flexion) pour des matériaux non ductiles. Les équations mathématiques générales de l'analyse de résistance des matériaux sont tirées de Baïlon (Baïlon & Dorlot, 2000). L'équation 1.1 est utilisée pour calculer le module d'élasticité en flexion et l'équation 1.2 est utilisée pour calculer la résistance maximale à la flexion.

$$E_{flexion} = \frac{L^3 F}{4bh^3d} \quad (\text{Éq. 1.1})$$

$$|\sigma_{max}| = \frac{3}{2} * \left(\frac{FL}{bh^2}\right) \quad (\text{Éq. 1.2})$$

Où

E représente le module d'élasticité en flexion, en Pascal.

F représente la charge appliquée au centre de l'éprouvette, en newton.

L représente la distance entre les appuis, en mètre.

b représente la largeur de l'éprouvette, en mètre.

h représente la hauteur de l'éprouvette, en mètre.

σ représente la contrainte, en Pascal.

Dans le plan où le moment de fléchissant M est maximal, les contraintes varient de façon linéaire selon le plan vertical de l'éprouvette. À l'axe neutre, les contraintes sont nulles. Du côté supérieur de l'axe neutre de l'éprouvette, les contraintes sont sous forme de compression et elles sont de signe négatif. Du côté inférieur, les contraintes sont en traction et elles sont de signe positif. Les valeurs maximales absolues de contrainte arrivent aux surfaces extérieures de l'éprouvette avec une position verticale de $\pm \frac{h}{2}$ par rapport à l'axe neutre. La figure 1.2 montre l'essai de flexion à trois points et la répartition des contraintes dans le plan où le moment fléchissant est maximal.

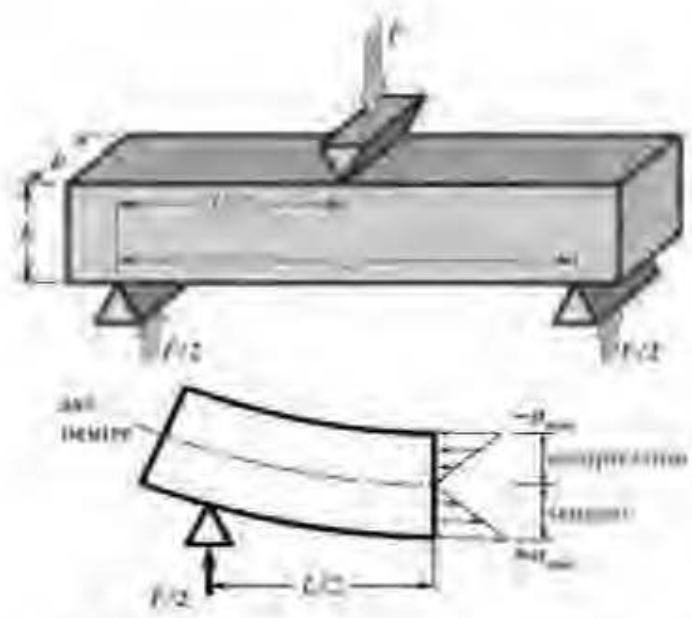


Figure 1.2 L'essai de flexion à trois points et la répartition des contraintes (Bailon & Dorlot, 2000)

1.2.2.2 L'essai de traction

L'essai de traction est couramment appliqué aux CBPs. Il consiste à soumettre une éprouvette sous forme prismatique à une traction et à mesurer son allongement Δx . Les têtes de l'éprouvette sont plus larges que la section centrale de l'éprouvette, ce qui permet de les fixer sur le banc d'essai mécanique. On divise la force de traction F par la section centrale S pour obtenir la contrainte σ (Éq. 1.3) et la définition de la déformation ϵ provenant de la division de l'allongement Δx par sa longueur initiale X_0 (Éq. 1.4). La courbe contrainte-déformation est généralement utilisée pour étudier les propriétés de traction. Plus précisément, la contrainte s'exprime en mégapascal (MPa) et la déformation s'exprime en pourcentage. Le module d'élasticité en traction est calculé dans la zone linéaire par l'équation 1.5

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad (\text{Éq. 1.3})$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta x}{X_0} * 100\% \quad (\text{Éq. 1.4})$$

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{F/S}{\Delta x/X_0} \quad (\text{Éq. 1.5})$$

1.2.3 Renforcement des propriétés mécaniques du CBP

Le renforcement de la résistance à la flexion et la résistance à la traction des CBPs est nécessaire pour que les CBPs soient applicables pour des applications en ingénierie ou pour des applications structurales. Touloum et al. (2012) ont résumé les différentes méthodes pour renforcer les propriétés mécaniques d'un matériau. Les différents chemins pour renforcer les matériaux sont par l'ajout de grosses particules, le renforcement par dispersion des particules, l'ajout des fibres alignées ou discontinues et par une structure spécifique (sandwich ou stratifiée).

Renforcements des propriétés par intégration de fibres dans les CBPs

Les fibres de renforcement intégrées dans un CBP peuvent améliorer ses propriétés mécaniques. Les fibres ajoutées dans les CBPs sont classées dans la catégorie de fibres synthétiques (fibres de verre, fibres de carbone, fibres d'aramide) ou dans la catégorie de fibres naturelles (fibres végétales et fibres animales). Amiotte (2011) a donné des exemples de propriétés mécaniques des fibres de différentes catégories. Le tableau 1.1 résume les propriétés mécaniques de diverses fibres.

Tableau 1.1 Les propriétés de diverses fibres de renforcement de différentes catégories. (Amiotte, 2011)

	Fibre	MOE (GPa)	MOR (MPa)	Déformation à la rupture (%)
Fibres synthétiques	Fibres de verre E	72	2200	3
	Fibres de carbone (Toray T300)	230	3500	1,5
	Fibres de carbone (Thorneel P120S)	825	2350	0,3
	Fibres d'aramide (Kevlar 49)	124	3620	2,9
Fibres végétales	Fibres de chanvre	35	389	3,27
	Fibres de lin	58	13,4	3,27
	Fibres de Jute	26,5	393-773	1,7
	Fibres de coton	5,5-12,6	287-597	7,5
Fibres animales	Fils d'araignée	7	600	30
	Fils de vers à soie (<i>Bombyx mori</i>)	16	600	15

Par rapport aux fibres naturelles, les fibres synthétiques possèdent une résistance à la rupture plus élevée que celle des fibres naturelles. Parmi les fibres synthétiques, les fibres de verre peuvent être utilisées dans les situations où le matériau à renforcer a une déformation modérée. Les fibres de carbone sont couramment utilisées dans les industries de haute technologie telles que l'aéronautique et l'automobile. Dû à la diminution du prix de production de fibres de carbone, l'utilisation des fibres de carbone est plus en plus répandue. Les fibres de carbone sont utilisées dans les industries civiles, électriques, de stockage d'énergie, sportives, de l'impression 3D, etc. En général, les propriétés mécaniques des fibres de polymère sont plus faibles que les fibres de verre ou les fibres de carbone. Naghipour et al. (2011) ont réalisé un essai de flexion à quatre points sur les CBPs renforcés par fibres de carbone et par fibres de verre.

Renforcements des propriétés par préparation des matériaux à structure hybride

Les matériaux hybrides sont des composites formés de différents matériaux et sous forme de multicouche (structure stratifiée ou structure en sandwich). Parmi les matériaux hybrides, les bois hybrides sont largement utilisés dans les secteurs de la construction, de la décoration et de l'aéronautique. (Vermeeren, 2002). Une grande catégorie de composites hybrides est appelée Glare (Glass Laminate Aluminium Reinforced Epoxy). Les CBPs peuvent être utilisés comme une peau pour les Glares. Ils possèdent une esthétique comparable à celle du bois naturel et sont collés avec une âme structurelle, en général une couche mince de métal. Mongkollapkit et al. (2010) ont ajouté une mince couche de fibres de verre entre deux couches épaisses de CBP composés de fibres de bois et d'une matrice de polychlorure de vinyle (WPVC) pour renforcer les propriétés de traction. La figure 1.3 montre l'assemblage de ce sandwich.

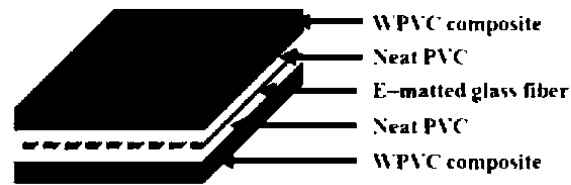


Figure 1.3 CBP renforcé par une couche de fibres de verre. (Mongkollapkit et al., 2010)

Hao et al. (2018) ont préparé des CBPs en structure de sandwich de CBP-LLDPE (polyéthylène à basse densité linéaire)-CBP. La figure 1.4 illustre la distribution des contraintes d'essai de flexion pour le CBP et le composite sandwich CBP-LLDPE-CBP. Elle est modélisée par l'analyse des éléments finis. Il est important de comparer les deux distributions de contraintes, leur similarité montre que la couche noyau de LLDPE agit comme un milieu de transfert de contraintes. Selon l'analyse de résistance des matériaux et la modélisation en 3D, l'ajout d'une couche centrale n'a aucune influence sur la résistance à la flexion des CBPs.

Cependant, le composite sandwich possédant de microfissures peut être considéré comme un corps fissuré, d'où le critère de Griffith intervient dans cette problématique (Griffith, 1921). Lorsqu'il est soumis à une force, la propagation de microfissures aura lieu pour le transfert d'énergie. L'existence de microfissures diminue la résistance à la flexion de composite sandwich.

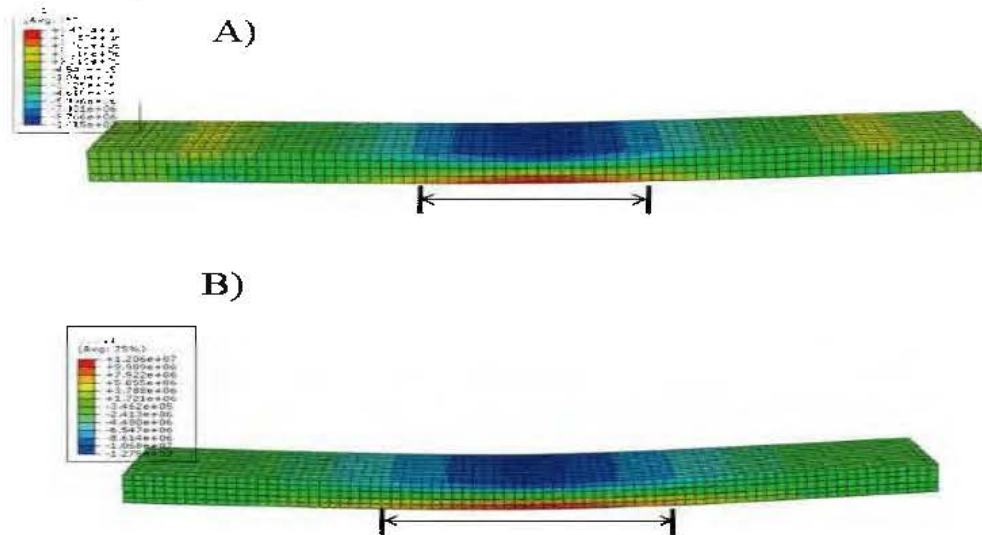


Figure 1.4 La distribution des contraintes de flexion : A) CBP; B) CBP-LLDPE-CBP; (Hao et al., 2018)

1.3 L'adhésion du CBP

1.3.1 Les techniques de l'assemblage

Pour l'assemblage de métaux et de CBP avec une matrice thermoplastique, différentes techniques d'assemblage existent telles que la soudure, le vissage et le rivetage et l'adhésion. Parmi ces méthodes, l'adhésion est la meilleure méthode pour l'assemblage de métaux et de CBPs. Les avantages sont évidents : le collage nécessite une faible quantité d'adhésif, il protège les surfaces d'assemblage (les substrats). De plus, le collage sera plus compatible pour les surfaces traitées par abrasion, par un traitement physico-chimique ou par un traitement Plasma à pression atmosphérique (Bres, 2017; Bridier, 2016; Thurston et al., 2007). Le composite obtenu par collage pourra être utilisé pour des usages extérieurs en raison de sa bonne étanchéité. En effet, peu d'eau sera absorbée par le composite. En plus, du côté mécanique, le lien de collage est continu et homogène, la force est répartie sur toute la surface et le composite obtenu

est résistant à la fatigue, aux chocs et aux vibrations. La figure 1.6 montre la répartition de force de différentes techniques d'assemblage

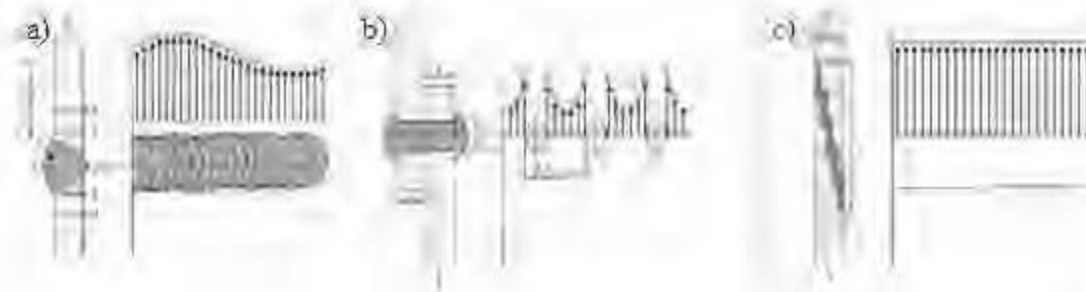


Figure 1.5 La répartition des forces des techniques d'assemblage, a) soudure b) rivetage c) collage (Bridier, 2016)

1.3.2 Le choix d'adhésif

Le choix d'adhésif est important pour adhérer deux objets lors de la conception d'un nouveau composite sandwich structural. Selon leur nature chimique, les adhésifs peuvent être classés selon trois catégories.

1) Les thermodurcissables

Les adhésifs thermodurcissables (ou thermodurs), souvent sous forme de pâte ou de liquides visqueux avant la réticulation, sont des polymères qui possèdent une structure tridimensionnelle. Ils sont rigides et possèdent de bonnes propriétés mécaniques telles que la résistance à la traction, la résistance à la flexion et la rigidité.

2) Les thermoplastiques

Les adhésifs thermoplastiques sont constitués de macromolécules linéaires ou ramifiées. Ils deviennent malléables par chauffage sans altération de leurs propriétés. Leurs structures sont désordonnées, les adhésifs thermoplastiques sont amorphes ou partiellement cristallins. Les adhésifs thermoplastiques sont plus rigides que les

adhésifs élastomères, cependant, leur résistance et rigidité sont inférieures à celles des thermodurcissables, ils sont des composés fusibles.

3) Les élastomères

Les adhésifs élastomères supportent de très grandes déformations avant la rupture, ils possèdent une grande aptitude à adhérer avec d'autres matériaux. Cependant, ils sont souples et peu résistants. L'adhésif d'époxy est un adhésif thermodurcissable structural largement utilisé dans l'industrie. Il peut transférer des contraintes entre deux substrats. Il possède une résistance au cisaillement supérieure à 7 MPa et peut être utilisé pour des produits extérieurs. L'époxy est un adhésif thermodurcissable qui possède de bonnes propriétés mécaniques, physiques et thermiques. L'époxy possède une grande résistance à la traction et est résistant à la compression. Son retrait et absorption d'eau sont faibles. Sa température de décomposition thermique est élevée. Selon la composition chimique de l'adhésif, il existe deux types d'époxy: mono ou bicomposant. L'application d'époxy monocomposant nécessite un préchauffage plus élevé que 120°C. L'époxy monocomposant est souvent nocif et coûteux, donc, il est préférable de choisir l'époxy bicomposant. L'adhésif d'époxy bicomposant est un liquide ou une pâte. La polycondensation entre la base d'époxyde et le durcisseur aminé forme un réseau stable tridimensionnel. Le diglycidyl-éther de bis-phénol A (DGEBA) est une des bases d'époxy les plus utilisées pour l'adhésif bicomposant. La figure 1.6 montre la synthèse de DGEBA pour une condition basique (Bruneaux, 2004)

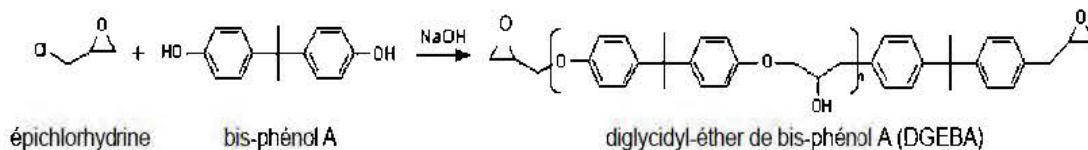


Figure 1.6 La synthèse de DGEBA pour une condition basique. (Bruneaux, 2004)

Selon la théorie de l'adhésion, l'épaisseur d'adhésif a un impact sur les propriétés mécaniques (Uehara et Sakurai, 2002). Kawashita et al. (2008) ont étudié l'effet de l'épaisseur de la couche d'époxy sur la force d'adhésion entre l'époxy et l'aluminium. Quand l'épaisseur de la couche d'époxy diminue, la force d'adhésion augmente; une couche mince d'époxy ($< 300 \mu\text{m}$) amène la meilleure adhésion (Kawashita et al., 2008).

1.3.3 Les traitements de surface du CBP

La plupart des CBPs possèdent une matrice de type polyoléfine et ont besoin d'un prétraitement de surface ou d'un adhésif spécial pour les assembler avec d'autres matériaux (Kraus et al., 2015). Le tableau 1.2 résume les méthodes individuelles utilisées pour activer la surface des CBPs selon les trois catégories (mécanique, physique, chimique).

On trouve des traitements de surface des CBPs individuels dans la littérature. Gupta et Laborie (2007) ont utilisé le traitement de UV/ ozone. Oporto et al. (2007) ont utilisé la méthode d'acide chromique pour activer la surface d'un CBP. À l'exception des traitements mécaniques, la plupart des méthodes individuelles sont résumées et mentionnées dans la publication de Gramlich et al. (2006).

Hou et al. (2017) ont combiné des traitements de surface pour l'adhésion de CBP-CBP à la base de polyéthylène. La surface du CBP est abrasée par un papier de ponçage #180 ($80 \mu\text{m}$). Ensuite, la surface est traitée par une solution de 10% polyisocyanate en poids dans une solution de chlorobenzène pendant 5 minutes à température ambiante. Finalement, le PP est déchargé par plasma pendant 20 secondes. Cette combinaison de traitements est rapide, elle permet d'activer la surface des CBPs et d'augmenter la polarité des CBPs. L'analyse par spectroscopie infrarouge et l'analyse de chimie de surface par XPS montrent que les traitements de surface ont un effet synergique sur

l'oxydation de polyéthylène dont la force d'adhésion de CBP et d'un autre CBP est améliorée (Hou et al., 2017).

Tableau 1.2 Les traitements de surface des CBPs (Kraus et al., 2015).

Mécanique	Physique	Chimique
Sablage	Plasma	Fluoruration
Abrasion	Corona	Acide Chromique
	Flamme	Ozone
	Laser	

Moghadamzadeh et al. (2011) ont effectué différents traitements (abrasion, corona, abrasion et corona) de surface de CBP avec matrice de PEHD (polyéthylène à haute densité) pour améliorer l'adhésion. En effectuant ces différents traitements de surface, l'angle de contact entre le CBP et la gouttelette d'eau et l'angle de contact entre le CBP et la gouttelette de diiodométhane ont diminué. Un profi-leur 2D a été utilisé pour mesurer les paramètres de rugosité linéique d'une surface de dimension de 200 µm* 200 µm. Les résultats montrent que les traitements de surface ont augmenté le Ra (Hauteur moyenne arithmétique) et Rz (Hauteur maximale arithmétique) de rugosité linéique. La spectroscopie infra-rouge a été utilisée pour évaluer la variation de la chimie de surface du CBP. Le résultat de spectre infra-rouge indique que les traitements de surface font apparaître les groupements chimiques, tels que carboxyles et

hydroxyles, ils pourront servir comme indicateurs d'adhésion pour les surfaces des CBPs.

1.3.4 La rugosité

Il y a peu de documents scientifiques au sujet de la rugosité, cependant, la rugosité est importante pour comprendre l'adhésion. Shi et al. (2008) ont étudié l'effet de l'ajout des différentes nanoparticules sur la force d'adhésion de l'acier et de l'époxy. L'abrasion de #150 sur le substrat donne une force optimale d'adhésion.

Uehara et Sakurai (2002) ont étudié le lien entre la rugosité de surface et le phénomène d'adhésion pour 5 types d'adhésif (résine d'époxy, cyanoacrylate, chlorure de vinyle, caoutchouc synthétique et cellulose). Ils ont prouvé que la présence de la rugosité optimale (3-6 μm) permet d'avoir la meilleure résistance à la traction de l'adhésion. Cependant, le résultat de force de pelage de différentes rugosités de surface est aléatoire, il n'y a pas de relation claire établie.

Selon Da Silva, Öchsner et Adams, (2011), une surface rugueuse possède une énergie de surface (G_0) plus élevée qu'une surface lisse. Pour la surface rugueuse, «la surface réelle» est plus grande que la surface nominale. Le Facteur de Wenzel R est le ratio de ces deux surfaces (Wenzel, 1936). L'équation 1.6 représente la définition du facteur de Wenzel

$$R = \frac{A_{vrai}}{A_0} \quad (\text{Éq. 1.6})$$

Avec :

A_{vraie} est l'aire de «la surface réelle», A_0 est l'aire de la surface nominale en supposant que la surface est idéalement plane.

1.3.3.1 La mesure de la rugosité

Plusieurs équipements permettent de mesurer les paramètres de rugosité d'une surface. Le tableau 1.3 résume les 4 équipements habituels couramment utilisés pour mesurer la rugosité de surface. Le testeur de rugosité et le microscope à force atomique (AFM) utilisent un stylet qui au contact des échantillons endommage la surface mesurée. La mesure par testeur de rugosité donne une mauvaise précision, le contact entre le stylet et l'échantillon peut causer l'usure à la surface de l'échantillon et également l'usure du stylet. La mesure par AFM est une méthode coûteuse et sa plage de mesure est limitée. La mesure par l'interféromètre à lumière blanche est une méthode sans contact, mais cette méthode possède plusieurs inconvénients. L'interféromètre est sensible aux vibrations, des tables amortissantes doivent être installées. L'utilisation est limitée à certains objets. La mesure d'un échantillon nécessite une correction de l'inclinaison par un goniomètre.

L'analyse de surface par la microscopie confocale à balayage est une méthode sans contact, le microscope confocal émet un faisceau laser qui balaye la surface de l'échantillon. Dans un système optique confocal sténopéique, lorsque l'élément se trouve dans le plan focal, la réflexion de la lumière peut être détectée par le récepteur. La méthode d'analyse de la rugosité surfacique par microscopie confocale a plusieurs avantages. Cette méthode analyse une surface suffisamment grande pour la rugosité de haute précision. L'échantillon de mesure peut être observé en couleur et les images peuvent être affichées en 3D, ce qui nous permet d'identifier les différentes composantes de CBP. La manipulation et l'observation sont faciles à réaliser, pas besoin de faire le prétraitement de l'échantillon.

Tableau 1.3 Comparaison des méthodes de mesures de la rugosité surfacique.(Kenyence, 2019)

Méthode	Avec contact, destructive		Sans contact, non destructive	
Instrument	Testeur de rugosité	Microscope à force atomique	Interféromètre à lumière blanche	Microscope confocal à balayage laser 3D
Résolution	1 nm	< 0,01 nm	< 0,1 nm	0,1 nm
Plage de mesure pour hauteur	< 1 mm	< 10 mm	< à quelques mm	< 7 mm
Plage de dimension	quelques mm	1-200 μm	40 μm - 15 mm	15 μm - 2,7 mm
Caractéristique angulaire	Impossible	Mauvaise	Moyenne	Bonne

1.3.3.2 Les paramètres de rugosité

Six paramètres de rugosité surfacique sont utilisés pour modéliser les surfaces d'aluminium et de CBP. Les six paramètres de rugosité surfacique sont : Sa (Hauteur moyenne arithmétique); Sq (Moyenne quadratique hauteur); Sku (Aplatissement); Ssk (Asymétrie); Str (Rapport d'aspect de texture); Sdr (Rapport de surface interfaciale développée);

Les formules de définition de paramètres de rugosité (ISO, 2012):

$$S_a = \frac{1}{A} \iint_A |z(x, y)| dx dy \quad (\text{Éq. 1.7})$$

$$S_q = \sqrt{\frac{1}{A} \iint_A z^2(x, y) dx dy} \quad (\text{Éq. 1.8})$$

$$S_{sk} = \left(\frac{1}{S_q^3} \right) \left[\frac{1}{A} \iint_A z^3(x, y) dx dy \right] \quad (\text{Éq. 1.9})$$

$$S_{dr} = \frac{1}{A} \iint_A \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\partial z(x, y)}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial z(x, y)}{\partial y} \right)^2} - 1 \right) dx dy \quad (\text{Éq. 1.10})$$

$$S_{ku} = \left(\frac{1}{S_q^4} \right) \left[\frac{1}{A} \iint_A z^4(x, y) dx dy \right] \quad (\text{Éq. 1.11})$$

$$S_{tr} = \frac{\min \sqrt{t_{x1}^2 + t_{y1}^2}}{\max \sqrt{t_{x2}^2 + t_{y2}^2}} \quad (\text{Éq. 1.12})$$

Avec :

A représente l'aire de l'échantillon

$z(x, y)$ représente la hauteur à la position x, y par rapport au plan moyen de la surface.

$|z(x, y)|$ représente sa valeur absolue $z(x, y)$.

* : La fonction d'autocorrélation f_{ACF} (Éq. 1.13) détermine la zone de chevauchement d'une surface. À partir de la fonction d'autocorrélation, on trouve l'équation de rapport d'aspect de texture S_{tr} (Éq. 1.12). D'où $f_{ACF}(t_{x1}, t_{y1}) \leq s$ (s : une valeur définie préalable par la microscopie confocale) et $f_{ACF}(t_{x2}, t_{y2}) \geq s$.

$$f_{ACF}(t_x, t_y) = \frac{\iint_A z(x, y)z(x - t_x, y - t_y) dx dy}{\iint_A z(x, y)^2 dx dy} \quad (\text{Éq. 1.13})$$

Pour mieux comprendre les paramètres de rugosité, les paramètres de rugosités sont classés par catégorie.

Les paramètres d'amplitude

A) S_a : Hauteur moyenne arithmétique

La hauteur moyenne arithmétique (S_a) représente la valeur absolue d'une moyenne arithmétique de la hauteur par rapport au plan moyen d'une surface définie. Elle est couramment utilisée pour représenter la rugosité d'une surface

B) S_q : Moyenne quadratique hauteur

La S_q représente la valeur d'une moyenne quadratique de hauteur par rapport au plan moyen d'une surface définie. Sachant que les hauteurs $z(x, y)$ d'un plan moyen d'une surface valent 0, elle peut représenter également l'écart-type des hauteurs.

La S_a et la S_q sont des paramètres d'amplitude de la rugosité surfacique, par la suite, si elles ont des propriétés similaires, on les remplace par les paramètres d'amplitude pour simplifier l'écriture, représenté par S_p .

Le paramètre de texture

Le paramètre Str (Rapport d'aspect de texture) explique l'uniformité de la texture de surface. Si la valeur Str est proche de 0, la surface est uniforme et périodique. Si la valeur de Str est proche de 1, la surface est irrégulière.

Les paramètres de distribution des hauteurs

A) Sku : Aplatissement

Le Sku (Kurtosis non normalisé) nous permet d'étudier la distribution des hauteurs d'une surface définie. En effet, un excès d'aplatissement positif ($Sku > 3$) correspond à une distribution leptokurtique, équivalent à une distribution pointue. Si le $Sku = 3$, on est dans la situation de distribution mésokurtique. La distribution des hauteurs de surface suit la loi normale. Si le $Sku < 3$, on parle d'une distribution platikurtique, la surface est aplatie (Baillargeon, 2004).

B) Ssk : Asymétrie;

La Ssk nous permet d'étudier le degré de biais de la distribution des hauteurs par rapport au plan moyen. Si les hauteurs sont également dispersées à la surface définie, la valeur de Ssk est égale à 0.

Les paramètres d'aire

A) Sdr : Rapport de surface interfaciale développée

Le paramètre Sdr représente le ratio de surface supplémentaire de la zone de définition par rapport à la zone de définition en supposant qu'elle soit idéalement planée. Le paramètre Sdr possède la même utilité que le facteur de Wenzel, il permet de présenter « la surface réelle » en considérant la présence de rugosité surfacique.

B) R : Facteur de Wenzel

Selon la définition du facteur de Wenzel dans la littérature (Éq. 1.6), on peut reformuler le facteur de Wenzel en utilisant l'intégrale double de surface.

$$R = \frac{1}{A} \iint_A \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\partial z(x, y)}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial z(x, y)}{\partial y} \right)^2} \right) dx dy \quad (\text{Éq. 1.14})$$

À partir de la définition de rapport de surface interfaciale développée (Éq. 1.10).

$$S_{dr} = \frac{1}{A} \iint_A \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\partial z(x, y)}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial z(x, y)}{\partial y} \right)^2} - 1 \right) dx dy \quad (\text{Éq. 1.10})$$

$$= R - \frac{1}{A} \iint_A 1 dx dy = R - 1$$

$$S_{dr} = R - 1 \quad (\text{Éq. 1.15})$$

On trouve le lien entre le facteur de Wenzel et le Sdr (Éq. 1.15). Pour la suite, le facteur de Wenzel (R) est utilisé pour énoncer des conclusions générales.

CHAPITRE II

APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE

2.1 Objectifs et hypothèses de recherche

L'objectif général du projet est de concevoir par l'ajout de fibres de carbone un composite hybride à base de bois et de propylène pour des usages structuraux et de fabriquer un composite stratifié CBP-Aluminium.

Les objectifs spécifiques sont:

- 1) Améliorer l'adhésion entre le composite et l'aluminium en utilisant un adhésif et en modifiant la rugosité de surface de l'aluminium et/ou du CBP
- 2) Étudier la relation entre la rugosité de surface et l'adhésion entre l'aluminium et le CBP.
- 3) Renforcer les propriétés mécaniques (flexion et traction) du CBP par l'ajout de fibres de carbone recyclées.

Cette étude est fondée sur les hypothèses suivantes :

Pour le volet qui consiste à améliorer l'adhésion du CBP avec l'aluminium :

- 1) Durant le procédé de production du CBP, l'étape d'extrusion et d'injection mène à un encadrement des fibres d'érable par le plastique PP, elles sont donc rarement présentes à la surface du CBP.
- 2) Les traitements de surface par voie mécanique (l'abrasion unidirectionnelle) et chimique, en utilisant les composés chromiques, changent la rugosité ou la composition chimique de surface du CBP et de l'aluminium. Donc, l'adhésion du CBP avec l'aluminium est améliorée.
- 3) Les abrasions unidirectionnelles de surface en utilisant de différentes grosseurs de papiers abrasifs (rugueuse, moyennement rugueuse, légèrement rugueuse, fine et sans abrasion) conduisent à différentes rugosités de surface et donnent différentes forces d'adhésion du CBP avec l'aluminium. Les surfaces ayant été traitées peuvent être quantifiées par une série de paramètres de rugosité. Certains paramètres de rugosité permettent de prédire la qualité de l'adhésion.
- 4) Sachant que l'aluminium est un matériau rigide, les propriétés mécaniques du composite sandwich CBP-Al-CBP sont supérieures à celles du CBP. Cependant, les traitements de surface (mécanique, chimique) produisent des microfractures à la surface (Critère de Griffith) et diminuent les propriétés mécaniques des composites sandwich telles que la résistance à la traction, la résistance à la flexion et la rigidité.

Pour le volet qui consiste à renforcer les propriétés mécaniques de CBP en utilisant les fibres de carbone :

- 5) Une bonne distribution de fibres de carbone dans le CBP et plus d'interactions avec l'agent de couplage MAPP diminuent la probabilité d'avoir des bulles d'air à l'intérieur du CBP et favorisent les propriétés mécaniques du CBP.

- 6) L'intégration d'une faible quantité de fibres de carbone permet d'améliorer certaines propriétés mécaniques telles que le module d'élasticité en flexion, la résistance à la flexion, le module de traction (MOE) et la résistance à la traction (MOR).

2.2 Matériels

Le polymère PP commercial utilisé est le PP Hival ® 2620 Polypropylene Impact Copolymer. C'est un copolymère non transparent, l'arrangement de groupements d'éthène est aléatoire et le pourcentage de l'éthane est inférieur à 6%. Selon sa fiche d'information, sa masse volumique est de 0,900 g/cm³, sa résistance à la traction est 24,1 MPa selon la norme standard ASTM D638 et son module de flexion à la déformation de 1% est 1,100 GPa selon la norme ASTM D 790 (ASTM, 2002, 2003). La méthode utilisée pour la production est le moulage par l'injection.

L'agent de couplage MAPP est le MITSUI ADMER™ AT2305A sous forme de poudre. Il possède des groupements d'anhydride maléique qui peuvent réagir aux groupements OH des fibres du bois. La figure 2.1 montre la structure du MAPP.

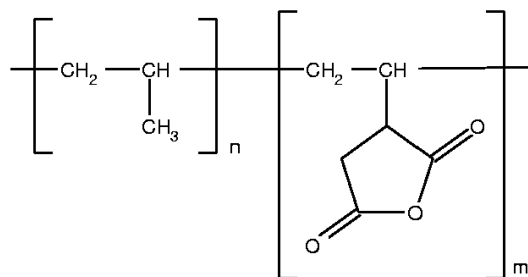


Figure 2.1 La structure chimique du MAPP. (Harper & Wolcott, 2006)

Les fibres de bois d'érable de 200 µm sont fournies par P.W.I. Industries, elles sont utilisées comme agent de renfort.

L'époxy de J-B Weld 8265S en 2 parties (ratio 1 :1) sous la forme de pâte de couleur gris foncé est utilisé pour le collage du CBP avec l'aluminium. La réaction de polymérisation entre les bases d'époxyde DGEBA et les amines forment un réseau polymère tridimensionnel stable où les nœuds de réticulation >N-R-N< sont présents. Selon la norme ASTM D 790, il possède une résistance à la flexion de 7320 psi (50,47 MPa). La température de déflexion est la température minimale de départ à laquelle l'objet commence à perdre sa résistance structurelle. Sa température de déflexion est de 39,2°C (ASTM D 648). Le temps de prise varie entre 4 et 6 heures. Sa composition chimique est indiquée dans l'annexe II.

2.3 Production et caractérisation des CBP

2.3.1 Procédé de production du CBP

La figure 2.2 montre les principales étapes de production du CBP.

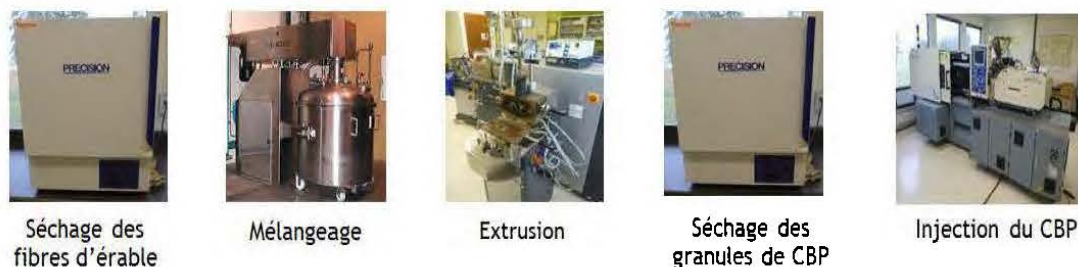


Figure 2.2 Les principales étapes de production des CBP.

L'étape de séchage des fibres d'érable est importante pour éviter la brûlure des fibres durant l'extrusion et l'injection du CBP. Les fibres d'érables sont séchées dans un four à 80 °C pendant 12 heures à pression ambiante. La teneur en humidité (H) est mesurée par un analyseur d'humidité (METTLER TOLEDO, HB43), la valeur de H des fibres d'érable est inférieure à 1% en masse.

Ensuite, les fibres d'érables, le PP et l'agent de couplage MAPP en poudre sont mélangés avec un ratio de 50 : 47 :3 en masse pendant 5 min dans un mélangeur pour avoir un mélange uniforme.

Ensuite, le mélange est introduit dans l'extrudeuse bis-vis (ThermoScientific HAAKE PolyLab OS Rheodrive 7 avec Rheomex Module d'extrusion OS). La température de mélange est 180 °C et la vitesse de mélange est de 100 rpm. Le CBP sous forme de filament est refroidi avec de l'eau et découpé par une granuleuse rotative. Par la suite, les granules du CBP sont séchées à 80 °C jusqu'à une valeur de H inférieure à 1%.

Finalement, les granules du CBP sont injectées et moulées par un injecteur-mouleur hydraulique (HAITAIN MARS II 130 / 600). Les granules du CBP sont injectés à 180 °C avec une pression hydraulique de 120 MPa pendant 5 secondes et le refroidissement est de 20 secondes. L'annexe I illustre les projections 3D des éprouvettes de tous les tests mécaniques réalisées en utilisant AutoCAD 2019.

2.3.2 Les traitements de surface

2.3.2.1 Le traitement de surface par voie mécanique

Les traitements de surface par voie mécanique sont réalisés en utilisant un banc de ponçage (KING INDUSTRIE) (Figure 2.3). Différentes abrasions unidirectionnelles (#80, #120, #180, #320) sont réalisées sur la surface de l'aluminium pour avoir une texture de surface uniforme et périodique. Les surfaces de l'aluminium sont ensuite nettoyées par une solution d'acétone et balayées utilisant de l'air comprimé.

L'abrasion unidirectionnelle utilisant un papier #180 sur la surface du CBP est également réalisée pour faire apparaître les fibres de bois. Les surfaces du CBP sont par la suite balayées utilisant de l'air comprimé.



Figure 2.3 Le banc de ponçage.

Les papiers abrasifs en aluminium #320, #180, #120, #80 sont utilisés. Ils ont des tailles moyennes de grains de 36 μm , 82 μm , 115 μm , 190 μm . Les papiers abrasifs avec des grains de grande taille permettent de retirer rapidement la matière. Le papier abrasif #320 est dans la catégorie de micrograin. Les papiers abrasifs #80, #120, #180 sont dans la catégorie de macrograin. Le papier abrasif # 80 est grossier et il attaque rapidement la surface. Le papier abrasif #120 est rugueux et est utilisé pour travailler le bois. Le papier abrasif #180 est moins rugueux et est utilisé pour la finition de la surface.

2.3.2.2 Le traitement de surface par voie chimique

La figure 2.4 montre le montage utilisé pour réaliser le traitement chimique. La surface du CBP est immergée dans un mélange contenant 20g de dichromate de sodium ($\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$), 40g d'eau distillée et 300 g d'acide sulfurique (96-98%) à 65 °C dans un bain-marie pendant 10 minutes. Une feuille d'aluminium couvre le bécher pour garder la température de solution et éliminer l'évaporation. L'excès de dichromate de sodium dans le mélange produit une précipitation rouge dans la solution noire. La surface de l'aluminium est dégraissée en utilisant une solution de trichloréthylène et non pas une solution d'acétone pour éviter le danger d'inflammation et d'explosion. Ensuite, la surface d'aluminium est immergée dans une solution d'acide chromique ($\text{CrO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$

1:4) à 78°C pendant 10 minutes dans un bain-marie. Une feuille d'aluminium couvre le bécher pour garder la température stable et éliminer l'évaporation de la solution.



Figure 2.4 Le traitement de surface par composés chromiques.

2.3.2.3 Mesure des paramètres de rugosité surfacique

Le microscope confocal 3D laser scanning (Vk-X150 Kenyence) permet de mesurer la rugosité surfacique. Le Figure 2.5 montre le montage de ce microscope. Selon la norme standard ISO 25178 Surface texture mesasurement, (Specification, 2012), il est obligatoire de traiter les signaux obtenus par le microscope pour former la surface S-L, où on pourra sortir les paramètres de rugosité surfacique. Pour ce faire, un filtre S (filtre passe-bas) a été utilisé pour éliminer le bruit et les interférences de la surface d'origine du CBP. La surface obtenue est appelée surface primaire. Puis, l'opération F a été appliquée à la surface primaire pour supprimer la forme de la surface primaire. La surface obtenue est une surface S-F.

Après cela, un filtre L (filtre passe-haut) a été utilisé pour éliminer les composants de grande échelle, tels que l'ondulation de la surface S-F. Le mode gaussien et la correction des effets de fin ont également été activés pour simuler la surface. Enfin, les

10 surfaces S-L de CBP et 7 surfaces S-L de l'aluminium de dimension $1400\ \mu\text{m} * 1000\ \mu\text{m}$, sont utilisées pour obtenir les paramètres de rugosité



Figure 2.5 Le microscope confocal 3D LaserVKX X150.

2.3.2.4 L'adhésion du CBP avec l'aluminium

Le pressage à chaud

La pâte d'époxy et le durcisseur d'époxy sont mélangés à un ratio 1 :1 durant 2 min. Une couche d'adhésif mince et homogène est souhaitable, des essais de collage et l'analyse de surfaces de rupture sont donc réalisés.

Essai 1 : Adhésion sans pressage à chaud

L'adhésion du CBP (50% fibres d'érable) avec l'aluminium de l'époxy sans pressage à chaud a été réalisée. Les cinq composites sandwich CBP-Al-CBP sont placés dans une chambre de conditionnement à une température de $23\ ^\circ\text{C}$ et une humidité relative de 50% (HR) pendant 3 jours avant de réaliser le test de décollement selon la norme ASTM D1037 (ASTM, 2005). Durant le durcissement de l'adhésif, le mélange d'époxy

est fluidifié et le ruban est utilisé pour fixer le composite sandwich. La figure 2.6 montre l'éprouvette de flexion à trois points du composite sandwich CBP-Al-CBP fixé par le ruban.



Figure 2.6 Le mode de fixation de composite sandwich CBP-Al-CBP.

Essai 2 : Adhésion avec pressage à chaud

L'essai d'adhésion du CBP (50% fibres d'érable) avec l'aluminium utilisant le pressage à chaud a été réalisé. La presse hydraulique à plateau (FONTIJNE) est utilisée. Les cinq composites sandwich CBP-Al-CBP sont préalablement fixés par le ruban avant le pressage. La température de pressage est de 70 °C et la durée de pressage est d'une minute, la force de pressage est calculée préalablement pour avoir une pression de 6 MPa. Ensuite, les échantillons sont conditionnés pendant 3 jours selon les spécifications de la norme ASTM D 1037 dans une chambre de conditionnement à 23 °C et une humidité relative de l'air de 50%. La figure 2.7 montre le montage d'essai de la force d'adhésion en utilisant un banc d'essai universel (ZWICK, Z020 (2 tonnes) - BT1-FR20TN-A50). La vitesse de test est de 1 mm /min.

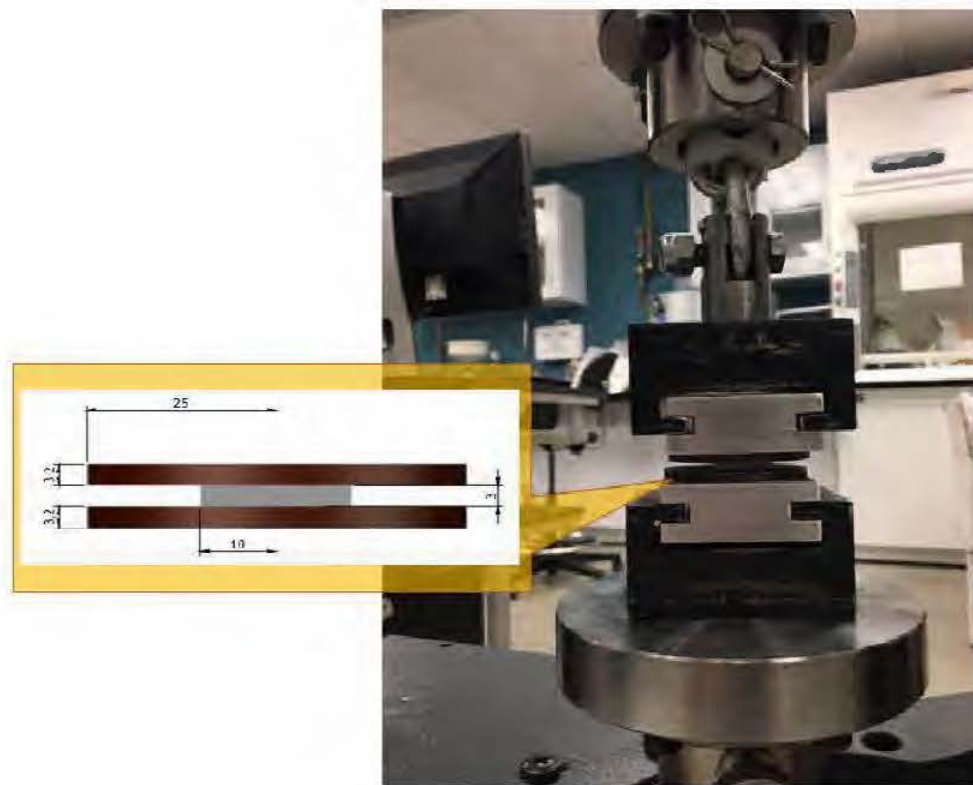


Figure 2.7 Le test d'adhésion du composite sandwich CBP-Al-CBP.

2.3.3 L'analyse de surface

2.3.3.1 L'analyse de surface par solution de fluorescence

La présence des fibres d'érable change la rugosité de surface du CBP. La matrice CBP est PP et est apolaire, les fibres d'érable possèdent des groupements organiques polaires. La présence des fibres d'érable augmente également la polarité de surface du CBP. C'est la raison pour laquelle, la présence des fibres d'érable à la surface des CBPs améliore leur adhésion avec l'aluminium. Il est utile de connaître la répartition des fibres à la surface. Les fibres d'érable étant riches en sucres, la présence de sucres dans les fibres d'érable nous permettent de les identifier à la surface. La solution o-toluidine

bleue (0,1% en poids) est une solution fluorescente qui réagit avec les sucres, la couleur bleue apparaîtra (Cyr, 2009) et est détectable sous microscope confocale.

Pour détecter la distribution de fibres d'érables à la surface des CBPs, ces derniers sont immergés dans une solution o-toluidine bleue (0,1% en poids) pendant 1 min à température ambiante, ensuite, le CBP est rincé à l'eau distillée avant de le placer sur la platine du microscope confocal.

2.3.3.2 L'analyse de surface par spectroscopie infrarouge (FTIR)

La spectroscopie émet un faisceau de lumière monochromatique de différentes fréquences, l'échantillon peut absorber certaines fréquences en raison d'activation de l'état fondamental à l'état excité de ses liaisons chimiques. Un ordinateur reçoit ce faisceau de lumière et calcule la quantité d'énergie absorbée à chaque fréquence de lumière. Selon la quantité d'énergie absorbée, on peut identifier les molécules. La comparaison des spectres de FTIR avant et après d'un traitement de surface permet d'indiquer le changement des molécules au surface. Cependant, au lieu de fréquence, le nombre d'onde (fréquence spéciale) est plus courant comme l'axe x en spectroscopie. Le nombre d'onde représenté par σ , il désigne l'inverse de la longueur d'onde λ ($\sigma = \lambda^{-1}$). Généralement, son unité cm^{-1} est utilisée dans la spectroscopie infrarouge. La spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (SHIMADZU - FTIR en mode Attenuated Total Reflectance moyen et proche IR) est utilisée pour analyser les surfaces des CBPs. La spectroscopie FTIR permet de détecter une plage du nombre d'onde de 4000 cm^{-1} à 500 cm^{-1} . Chaque échantillon a été balayé 64 fois dans cette plage.

2.4 Méthodologie pour établir le lien entre la rugosité et l'adhésion

Parmi les paramètres de rugosité surfacique, les paramètres d'amplitude ($S\phi$) et d'aire sont les plus probables d'avoir des impacts sur la force d'adhésion. Les valeurs de S_a ,

Sq, Sdr et Wenzel de tous les échantillons de chaque groupe d'aluminium et de CBP sont énumérés dans l'annexe III. Les analyses statistiques et de probabilité, telles que l'analyse de variance (ANOVA), la comparaison multiple, l'analyse en composantes principales (PCA) et l'analyse de régression nous permettent d'établir le lien entre les paramètres de rugosité et la force d'adhésion.

2.4.1 L'analyse de variance à un facteur (one-way ANOVA)

Tout d'abord, les moyennes des paramètres de rugosité des différentes surfaces sont comparées pour savoir si les traitements de surface changeront les paramètres de rugosité de façon significative. Pour comparer des moyennes de paramètres de rugosité (Sa, Sq, Sdr), le puissant outil de la statistique, connu sous le nom d'analyse de variance à un facteur (one-way ANOVA), permet de tester l'hypothèse d'égalité H_0 des k groupes ($n \geq 2$). Le principe de cette technique consiste à décomposer la variation totale en diverses composantes provenant de différentes sources. Par la suite, en utilisant un tableau d'analyse de variance, tester quelles sont les sources de variation significatives.

Hypothèses statistiques :

Pour la démarche de cette technique d'analyse, d'abord les hypothèses sont établies :

$$H_0 : M_1 = M_2 = \dots = M_j \dots = M_k.$$

H_1 : les M_j ne sont pas tous égaux

Dans le cas des paramètres de rugosité, les hypothèses que l'on veut vérifier sont :

$H_0 : M_1 = M_2 = \dots = M_j \dots = M_k$. (La moyenne d'un paramètre de rugosité, peu importe la méthode de traitement de surface utilisé)

H_1 : les M_j ne sont pas tous égaux

D'où la moyenne d'un paramètre de rugosité peut-être soit S_a , S_q ou S_{dr} de l'aluminium.

Conditions d'application du test :

On suppose que :

- a) Les données de rugosité proviennent d'échantillons prélevés au hasard et indépendamment.
- b) Les k groupes possèdent n échantillons distribués de façon normalement.
- c) Les variances des k groupes sont identiques.

Décomposition de la variation des données :

Pour l'analyse de variance, on calcule le rapport de la variance, c'est un quotient de la variance intergroupe (liée aux différences entre les conditions expérimentales) et de la variance intragroupes (qui n'est pas liée aux conditions expérimentales). La relation fondamentale d'analyse de variance est :

$$(\bar{X}_{ij} - \bar{X}) = [(\bar{X}_j - \bar{X}) + (\bar{X}_{ij} - \bar{X}_j)] \quad (\text{Éq. 2.1})$$

D'où :

\bar{X}_{ij} représente la i ième donnée parmi les n mesures de j ième groupe parmi les k groupes.

\bar{X} représente la moyenne globale ou la moyenne générale.

\bar{X}_j représente la moyenne des résultats du j ième groupe.

$\bar{X}_j - \bar{X}$ représente la différence entre la moyenne de j ième groupe et la moyenne globale.

$\bar{X}_{ij} - \bar{X}_j$ représente la différence entre la j ième mesure du i ième groupe et la moyenne du i ième groupe.

En élevant au carré et faisant les sommations de chaque donnée des k groupes des n mesures, on trouve l'équation suivante:

$$\sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^n (X_{ij} - \bar{X})^2 = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^n (\bar{X}_j - \bar{X})^2 + \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^n (X_{ij} - \bar{X}_j)^2 \quad (\text{Éq. 2.2})$$

On peut simplifier comme suit:

$$SCT = SC_F + SC_{RES} \quad (\text{Éq. 2.3})$$

D'où :

SCT représente la somme des carrés de la variation globale.

SC_F représente la somme des carrés de la variation du facteur considéré.

SC_{RES} représente la somme des carrés de la variation résiduelle.

Calcul du rapport F

Le rapport entre le carré moyen du facteur considéré (degré de liberté de CM_F = k-1) et le carré moyen résiduel (degré de liberté de CM_{RES} = n-k) est représenté par F. La valeur de F doit être comparée à une valeur critique qui est indiquée dans le tableau de la distribution de Fisher-Snedecor au seuil signification α à (k-1) et (n-k) degrés de liberté (ddl). Les équations mathématiques associées sont les suivantes :

$$CM_F = \frac{1}{(k-1)} \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^n (\bar{X}_j - \bar{X})^2 = \frac{SC_F}{(k-1)} \quad (\text{Éq. 2.4})$$

$$CM_{RES} = \frac{1}{(n-k)} \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^n (X_{ij} - \bar{X}_j)^2 = \frac{SC_{RES}}{(n-k)} \quad (\text{Éq. 2.5})$$

D'où

$$F = \frac{CM_F}{CM_{RES}} = \frac{(n-k)}{k-1} \frac{\sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^n (\bar{X}_j - \bar{X})^2}{\sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^n (X_{ij} - \bar{X}_j)^2} \quad (\text{Éq. 2.6})$$

Le logiciel R de la version 3.4.4 est utilisé pour effectuer ANOVA.

2.4.2 Comparaison multiple

Ensuite, la comparaison multiple par le test de Tukey DSH (différence significative honnête) est utilisée pour évaluer, par exemple, si les moyennes des paramètres de rugosité surfacique sont significativement différentes l'une de l'autre. Les boîtes à moustaches avec un quantile de 25% sont utilisées pour distinguer les différentes classes de résultats.

2.4.3 Analyse de composantes principales (PCA)

L'analyse de composantes principales (PCA) est une méthode couramment utilisée pour identifier les variables les plus importantes en réduisant les données redondantes.

2.4.4 Analyse de régression

Pour établir la relation entre les paramètres de rugosité et la force d'adhésion. L'analyse de régression est effectuée à l'aide du logiciel R. Quatre modèles sont utilisés :

Modèle 1 : Force \sim Sa

Modèle 2 : Force \sim Wenzel

Modèle 3 : Force \sim (Sa + Wenzel)

Modèle 4 : Force \sim (Sa*Wenzel)

On veut choisir le meilleur modèle parmi les quatre modèles. Le modèle 1 suppose qu'il existe une relation linéaire directe entre la rugosité arithmétique et la force d'adhésion. Le modèle 2 suppose qu'il y a une relation linéaire directe entre le facteur de Wenzel et la force d'adhésion. Le modèle 3 suppose que la rugosité arithmétique et le facteur de Wenzel influencent la force d'adhésion, cependant, la rugosité arithmétique et le facteur de Wenzel ne sont pas corrélés. Le modèle 4 suppose que la rugosité arithmétique et le facteur de Wenzel influencent la force d'adhésion et que la rugosité arithmétique est corrélée avec le facteur de Wenzel. Les hypothèses pour réaliser l'analyse de régression sont identiques à celles de l'analyse de variance. Elles sont encore valides. Le package AICcmodavg du logiciel R permet de mettre en œuvre la sélection de modèles et l'inférence multimodèle sur la base des données du critère d'Akaike (AIC) et de l'AIC de second ordre (AICc).

2.5 Renforcement du CBP

2.5.1 Intégration de fibres de carbone

Parmi les fibres de renforcement synthétiques, les fibres de carbone sont plus susceptibles d'être utilisées pour le renforcement des propriétés mécaniques des CBPs pour des applications structurales. Ils ont une grande résistance mécanique et leurs résistances à la compression et à la fatigue sont les meilleures parmi les fibres de renforcement synthétiques (Amiotte, 2011).

Le CBP contenant 50% de fibres d'érable est renforcé par l'ajout de 3%, 6% et 9% de fibres de carbone. Des pastilles de fibres de carbone hachées (PX -35, type 65) avec une longueur de fibre de 6 mm et contenant une base d'époxy de 2,75% ont été fournies par Zoltek. La fiche d'information indique que son module d'élasticité est 242 GPa, sa résistance à la rupture est de 4137 MPa et sa déformation maximale est de 1,5%. Les thermoplastiques d'ingénierie étant destinés à un usage commercial, il est recommandé que des fibres de carbone soient utilisées dans leur fabrication. La production de CBP renforcé par des fibres de carbone est quasiment identique à la production de CBP sans fibres de carbone mentionné dans le chapitre 1.

Des différents essais de paramètres de procédé sont réalisés pour avoir une bonne dispersion de fibres de carbone dans le CBP et une bonne interaction de fibres de carbone avec l'agent de couplage MAPP. D'abord, le premier essai réalisé est la méthode d'injection directe. On mélange directement les granules de CBP avec les fibres de carbone, ensuite, le mélange est injecté par l'injecteuse-mouleuse. Dans les éprouvettes de caractérisation mécanique, la dispersion de fibres de carbone est mauvaise, l'interaction entre fibres de carbone avec l'agent de couplage MAPP est absente, la présence des bulles d'air à l'intérieur du CBP est observée, ces CBPs produits par cette méthode possèdent une résistance à la flexion inférieure à celle des CBP sans fibres de carbone. Le deuxième essai réalisé consistait à faire une extrusion double. Les granules de CBP obtenus par l'extrusion sont reextrudés avec les fibres de carbone. La distribution de fibres de carbone est bonne, il n'existe pas d'interaction entre les fibres de carbone avec l'agent de couplage MAPP. Les bulles d'air à l'intérieur du CBP ne sont pas présentes. D'après l'essai de flexion à trois points, par rapport au CBP sans fibres de carbone, la résistance à la flexion n'est pas améliorée. On réalise l'essai d'extrusion simple pour intégrer les fibres de carbone dans le CBP. Les fibres de carbone sont mélangées avec le mélange de MAPP, PP et les fibres d'érable. Par la suite, le mélange a subi une seule étape d'extrusion pour que les fibres d'érable puissent se disperser de façon homogène et réagir avec l'agent de couplage MAPP. Les bulles

d'air à l'intérieur du CBP ne sont plus présentes, l'augmentation de la rigidité et de la résistance du CBP est évidente. Par la suite, on applique la méthode d'extrusion simple de fibres de carbone pour intégrer les fibres de carbone dans le CBP.

2.5.2 Renforcement du CBP en préparant des composites hybride

Pour préparer de composites en sandwich, le procédé de production et la forme de sandwich sont identiques à la préparation d'éprouvette de test d'adhésion en utilisant l'injecteuse-mouleuse hydraulique HAITAIN MARS II 130 / 600, mentionnée dans la section 2.3 de ce chapitre. La qualité de collage influence les performances mécaniques et la durée de vie du composite à structure sandwich. Gay et Hoa (2007) ont proposé une plage d'épaisseur d'adhésif de 25 μm à 0,2 mm pour la manipulation. Le procédé de préparation du composite en sandwich CBP-Al-CBP par une presse à plateaux chauffants rend l'épaisseur de l'adhésif approximative à 100 μm . Les sandwichs composites CBP-Al-CBP sont préparés par pressage à chaud. Les paramètres de procédé (70 °C, 1 min, 6 MPa) sont identiques à ceux de production de sandwichs composites pour le test d'adhésion.

2.5.3 Caractérisation des propriétés mécaniques

La figure 3.5 montre le montage de l'essai de flexion à trois points et le montage de l'essai de traction selon les normes standard ASTM D 790 et ASTM D 638. (ASTM, 2002, 2003). Pour l'essai de flexion du CBP, 5 éprouvettes ont été testées. Les épaisseurs du CBP non renforcé et renforcé par fibres de carbone sont de 3,2 mm. La distance entre les appuis est calculée à partir de l'épaisseur du composite selon la norme standard ASTM D790. La distance entre les appuis est de 52 mm, la vitesse de la charge est de 2,0 mm / min. Pour l'essai de flexion des composites sandwich, la situation est différente. L'épaisseur de la couche du noyau en aluminium est 0,5 mm, les deux couches de CBP de 3,2 mm sont abrasées et leur épaisseur est réduite à 3,0 mm afin d'avoir une épaisseur de composite de 6,5 mm. Avec cette épaisseur, la distance entre

les deux appuis est de 104 mm, légèrement inférieure à la limite de la distance entre les deux appuis, soit 105 mm. La vitesse de la charge pour le composite sandwich est de 2,6 mm / min.

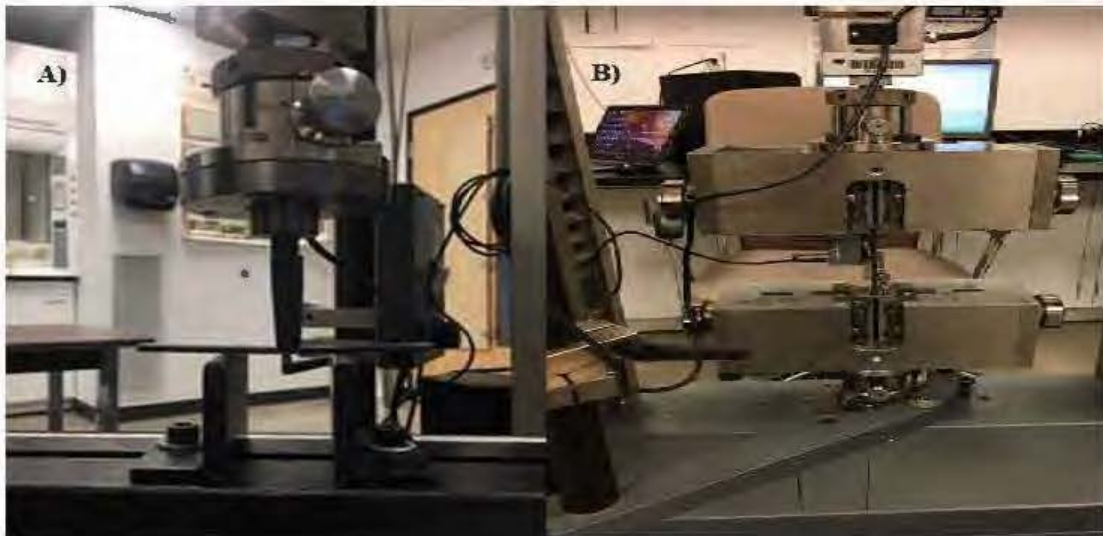


Figure 2.8 Le montage des essais mécaniques : A) L'essai de flexion à trois points; B) L'essai de traction;

Pour l'essai de traction, les CBPs de 3,2 mm et les composites sandwich de 6,5 mm ont les mêmes paramètres d'essai de traction. Cinq éprouvettes de type I sous forme prismatique ont été testées selon la norme standard ASTM D638. La vitesse de l'essai de traction est de 5 mm / min.

CHAPITRE III

RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1 La composition de la surface du CBP

La figure 3.1 montre que les différentes surfaces du CBP immergées dans la solution o-toluidine bleue sont détectées par microscopie confocale. Pour la surface des CBP non traités, peu de taches de couleur bleue sont détectées, donc il y a peu de fibres d'érable à la surface de ces CBP. La majorité des fibres d'érable sont enrobées par le plastique. Pour les surfaces des CBPs traitées par voie chimique, les taches de bleu sous forme de rond sont observées où les fibres d'érable sont présentes. La surface des CBPs traités par abrasion unidirectionnelle possède beaucoup de taches bleues, la présence de fibres de bois après une abrasion #180 montre que l'abrasion attaque fortement le polymère et expose la fibre de bois à la surface du CBP.

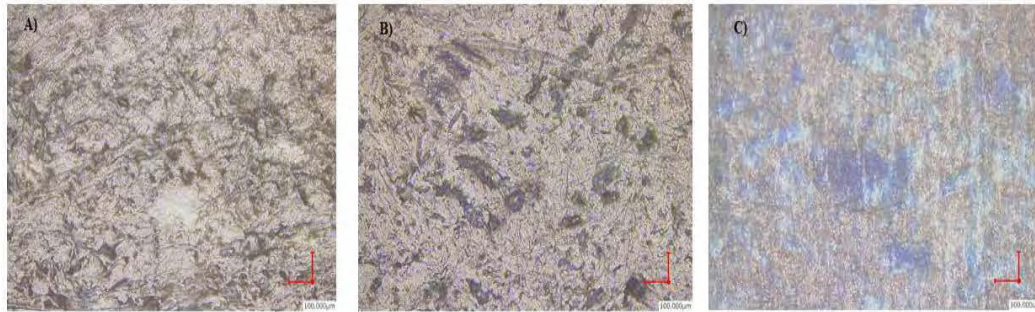


Figure 3.1 La surface d'un CBP (50%) : A) - Sans traitement; B) - Après traitement chimique; C) -Après abrasion #180;

La figure 3.2 montre les spectres d'absorption de FTIR (64 scans avec résolution de 4 cm^{-1}) des surfaces des CBPs avec et sans traitements de surface. Les groupements chimiques, tels que le carbonyle, l'hydroxyle et les groupements de fibres de bois sont des bons indicateurs des surfaces des CBPs.

L'élongation du groupement hydroxyle (O-H) se trouve aux environ de 3300 cm^{-1} et l'élongation du groupement carboxyle (C=O) se trouve aux environ de 1700 cm^{-1} , ils nous permettent de comparer approximativement la quantité de fibres d'érable des CBPs. Les spectres des CBPs abrasés avec #180 possèdent la plus grande absorbance des groupements hydroxyle et carboxyle, les spectres des CBPs sans traitements possèdent une intensité d'absorbance des groupements hydroxyle et carboxyle inférieure. Les fibres d'érables sont présentes sur ces deux surfaces et plus de fibres sont présentes à la surface des CBPs abrasés. On observe une diminution des groupements carboxyle et hydroxyle des CBPs traités par voie chimique, ce qui signifie que la surface des CBPs est oxydée par le mélange de dichromate de sodium et d'acide sulfurique concentré. La figure 3.3 compare la surface de CBP non oxydée et oxydée par voie chimique, le traitement de surface par voie chimique a blanchi la surface du CBP.

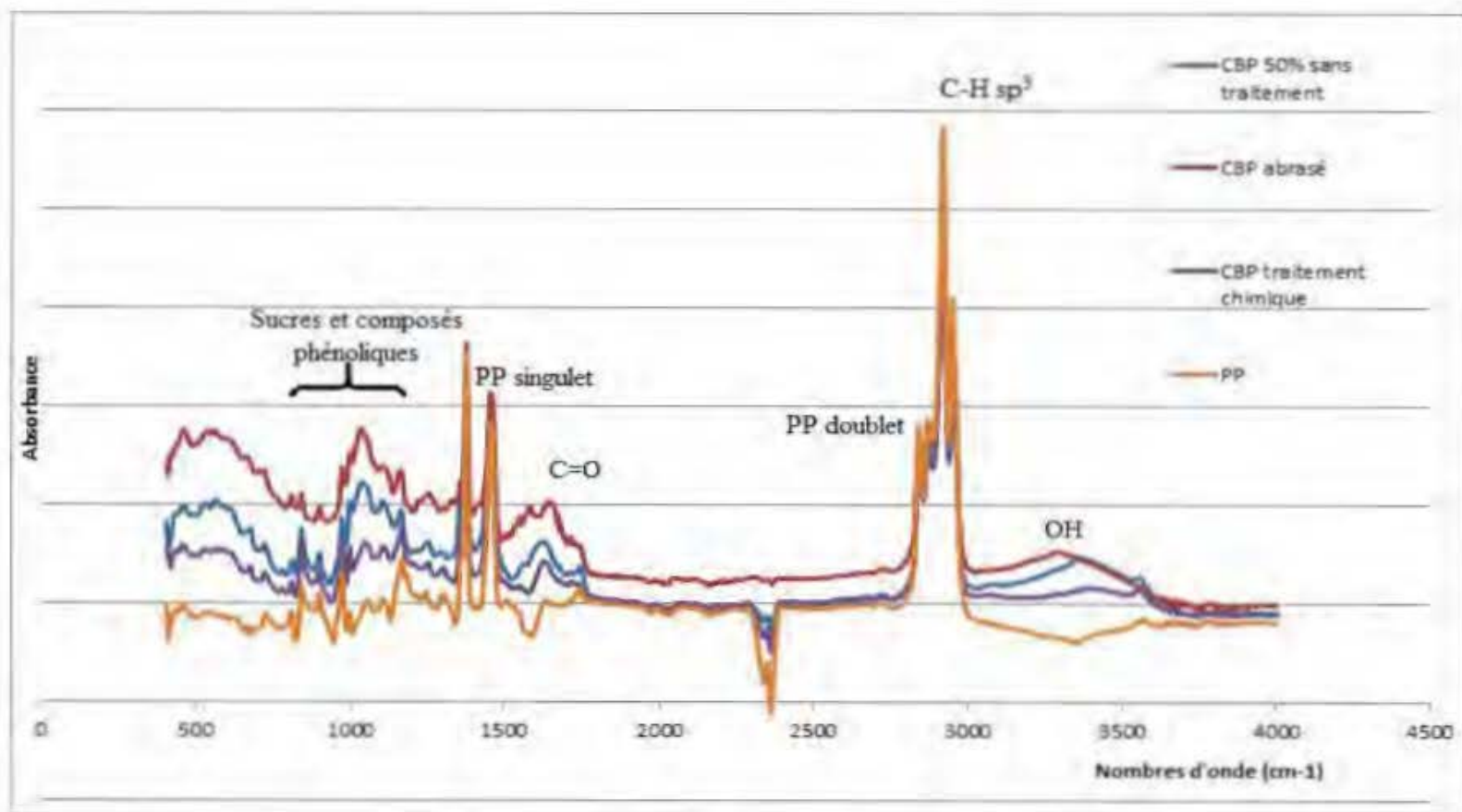


Figure 3.2 Le spectre IR de différentes surfaces.



Figure 3.3 La surface de CBP non oxydée (à gauche) et oxydée (à droite).

L'absorbance des composés qui caractérisent les fibres d'érable telles que les phénoliques et les sucres (principalement le saccharose) se trouve dans la plage entre 875 cm^{-1} et 1175 cm^{-1} (AZOM, 2014). Il est impossible d'analyser tous les pics du spectre FTIR de cette zone indépendamment. Si l'on regarde cette zone dans son ensemble, le résultat d'absorbance nous confirme les conclusions obtenues par l'analyse de l'élongation des groupement hydroxyle et carboxyle des spectres FTIR.

La matrice PP copolymère possède un singulet à 719 cm^{-1} , un autre à 1468 cm^{-1} et un doublet (2920 cm^{-1} et 2851 cm^{-1}) correspondant à l'élongation du groupement C-H sp^3 du PP se trouve à environ 3000 cm^{-1} . Toutes les surfaces possèdent une absorbance similaire du groupement C-H sp^3 .

3.2 Les paramètres de rugosité surfacique

Les moyennes des paramètres de rugosité surfacique sont présentées au tableau 3.1.

Les paramètres d'amplitude

Les mesures de S_a des surfaces montrent que les différentes abrasions unidirectionnelles permettent augmenter la hauteur moyenne arithmétique de surface.

De plus, parmi les surfaces d'aluminium traitées, on trouve que l'abrasion #120 de l'aluminium est l'abrasion optimale. Elle possède la plus grande valeur de Sa. La Sa des surfaces des CBPs traitées par voie chimique est plus élevée par rapport à celle des surfaces non traitées. Par contre, le traitement chimique a baissé la Sa des surfaces d'aluminium. Les conclusions obtenues à partir des valeurs de Sq sont similaires à celles des valeurs de Sa précédemment. Cependant, les valeurs de Sq sont plus grandes que les valeurs de Sa.

Tableau 3.1. Paramètres de rugosité surfacique des surfaces selon la norme ISO 25178.

Type	Sa	Sq	Sku	Ssk	Str	Sdr
	μm	μm	Adim	Adim	Adim	Adim
Al sans abrasion	1,262	2,330	3,190	-0,373	0,01	1,042
Al abrasion #320	1,646	2,161	3,936	-0,166	0,353	2,188
Al abrasion #180	1,706	2,211	3,850	-0,202	0,265	2,247
Al abrasion #120	1,791	2,330	3,828	-0,188	0,15	2,126
Al abrasion #80	1,731	2,240	3,813	-0,218	0,184	2,184
Al traité chimiquement	1,005	1,276	3,027	-0,291	0,036	0,8780
CBP (50% de fibres) sans abrasion	1,485	1,926	3,609	-0,093	0,618	1,801
CBP (50% de fibres) abrasion #180	1,603	2,080	4,497	0,096	0,871	2,030
CBP (50% de fibre) traité chimiquement	1,701	2,202	3,754	-0,044	0,839	2,966

Le paramètre de texture

La figure 3.4 montre la texture de surfaces d'aluminium et de CBP. Les surfaces d'aluminium ont un Str qui est à peu près égal à 0 et une texture quasi uniforme et périodique. Dû à la présence de fibres d'érable, les surfaces de CBP (50% fibres) sont irrégulières et non périodiques et leur Str est à peu près égale à 0,6. Les traitements de surface par l'abrasion unidirectionnelle et par voie chimique ont augmenté la valeur Str, donc, les traitements de surface rendent les surfaces des CBPs non uniformes. Les différentes abrasions unidirectionnelles de l'aluminium ont augmenté la valeur Str, les surfaces de l'aluminium deviennent non uniformes. Cependant, le traitement chimique de la surface d'aluminium réduit le Str de surface et l'uniformité de surface est peu changée.

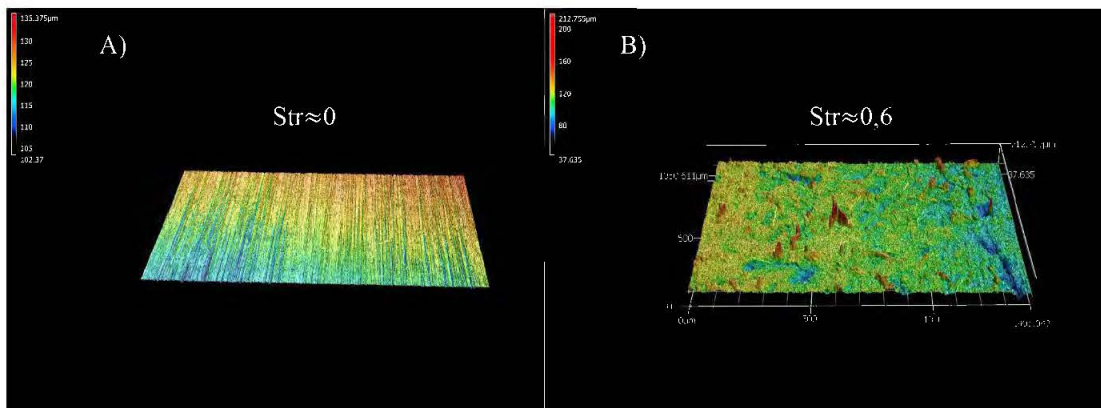


Figure 3.4 L'aspect texture de surface : A) Al ($Str \approx 0$); B) CBP (50% fibres) ($Str \approx 0,6$);

Les paramètres de distribution des hauteurs

Selon les résultats que l'on a obtenus, la surface d'aluminium traitée par voie chimique possède une valeur de Sku proche de 3, la distribution des hauteurs suit la loi normale. Les surfaces d'aluminium et les surfaces des CBPs traitées par différentes abrasions unidirectionnelles augmentent la valeur de Sku , leur valeurs de Sku étant supérieure à

3 (distribution leptokurtique des hauteurs). On peut conclure que les différentes abrasions de surface rendent la distribution des hauteurs plus aigüe.

Les valeurs de Ssk obtenues montrent que toutes les surfaces d'aluminium et des CBPs sont quasi symétriques, mais elles sont légèrement inférieures à 0. C'est-à-dire, l'étalement des hauteurs est plus important sur le côté inférieur du plan moyen. (Baillargeon, 2004).

Les paramètres de l'aire

Selon les résultats de Sdr obtenus, les surfaces d'aluminium non traitées possèdent une valeur de Sdr égale à 1,042, c'est-à-dire, la présence de rugosité surfacique mène à une surface supplémentaire de 104,2% par unité de surface. Les résultats de Sdr indiquent que les abrasions unidirectionnelles et le traitement chimique à la surface des CBPs ont augmenté leurs valeurs de Sdr. La présence de fibres d'érable dans le CBP améliore l'adhésion du CBP avec l'aluminium.

3.3 Les résultats d'adhésion

3.3.1 Analyse de substrat après la rupture

L'analyse de substrat après la rupture du test d'adhésion nous permet d'évaluer la qualité du procédé d'adhésion. La figure 3.5 correspond aux substrats avec une mince couche d'époxy obtenus par le procédé sans presse à chaude. En raison de la présence de grands pores d'air dans l'époxy, la rupture a lieu au centre de la couche d'époxy. On observe une couche d'époxy d'environ 110 μm à la surface d'aluminium et une couche d'époxy d'environ 140 μm à la surface des CBPs (50% de fibres, sans traitement de surface). L'épaisseur d'adhésif est environ 250 μm au total. Le procédé d'adhésion avec la presse à chaud élimine les grands pores d'air. Il nous permet d'avoir une couche d'époxy plus mince et plus homogène. La figure 3.6 A) montre la couche d'époxy sur le substrat d'un CBP (50% de fibres, sans traitement de surface). Après le

décollage, on observe que la couche d'époxy est entièrement collée à la surface du CBP, l'épaisseur de l'époxy est environ $150\ \mu\text{m}$.

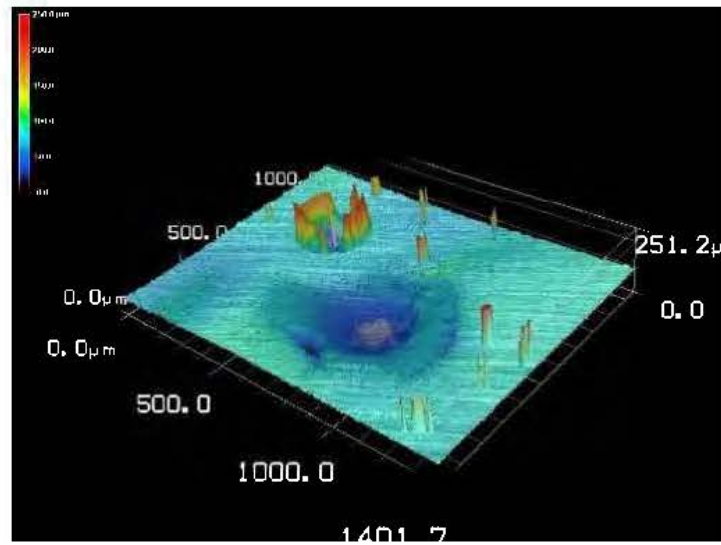


Figure 3.5 La surface d'adhésif avec pores d'air en 3D (10x).

Cependant, la figure 3.6 B) montre la surface d'époxy d'un CBP (50% fibres d'érable) abrasée, la surface d'époxy non homogène est entièrement collée à la surface du CBP abrasée. Les fibres de bois sont apparues après l'abrasion, elles sont entourées par des pores. L'épaisseur de la couche d'époxy a diminué à $100\ \mu\text{m}$, ce qui signifie que l'adhésif est plus compatible avec la surface abrasée.

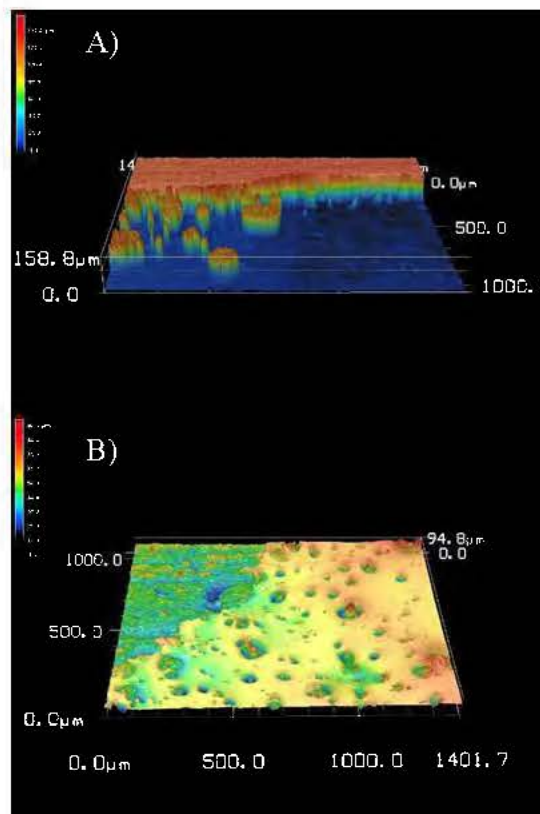


Figure 3.6 L'interface entre l'époxy et le CBP (50%) : A) – CBP sans traitement; B) – CBP traité par abrasion;

3.3.2 Les résultats d'adhésion

Le tableau 3.2 présente les résultats d'adhésion selon la norme ASTM D1037. Cinq échantillons ont été testés pour chaque groupe. Le composite sandwich PP – Al – PP (groupe 1) nécessite une force de 121 N, équivalent à une contrainte de 0,3 MPa, pour atteindre la rupture des couches. Le composite sandwich CBP (50%) – Al – CBP (50%) (groupe 2) nécessite une force de 203 N (0,51 MPa) pour atteindre la rupture des couches. La présence de fibres d'érable dans le CBP améliore l'adhésion du CBP avec l'aluminium.

Tableau 3.2 Les résultats des tests d'adhésion

	Groupe	Adhésion	
		F max (N)	σ max (MPa)
1	PP – Al – PP	121 ± 9	0,3 ± 0,02
2	CBP (50%) – Al – CBP (50%)	203 ± 24	0,51 ± 0,06
3	CBP (50%) abrasion #180 – Al – CBP (50%) abrasion #180	299 ± 15	0,75 ± 0,04
4	CBP (50%) abrasion #180 – Al abrasion #320 – CBP (50%) abrasion #180	367 ± 16	0,92 ± 0,04
5	CBP (50%) abrasion #180 – Al abrasion #180 – CBP (50%) abrasion #180	478 ± 22	1,2 ± 0,06
6	CBP (50%) abrasion #180 – Al abrasion #120 – CBP (50%) abrasion #180	787 ± 52	1,97 ± 0,13
7	CBP (50%) abrasion #180 – Al abrasion #80 – CBP (50%) abrasion #180	619 ± 32	1,55 ± 0,08
8	CBP (50%) – Al chimique – CBP (50%) chimique	492 ± 35	1,23 ± 0,09

À partir de mes essais préliminaires, l'abrasion #180 est l'abrasion la plus faible qui fait apparaître les fibres d'érable à la surface du CBP. La combinaison de l'abrasion de grosseur #120 de l'aluminium et #180 du CBP (groupe 6) donne la plus grande force d'adhésion à 787 N, soit une contrainte de 1,97 MPa. Le groupe 6 possède une force d'adhésion de 3,88 fois plus grande que celle du groupe 2 qui n'a pas subi de traitements de surface.

3.3.3 La relation entre la rugosité et l'adhésion

3.3.3.1 L'analyse de variance à un facteur (one-way ANOVA)

D'abord, les hypothèses sont vérifiées. Pour l'hypothèse de normalité, elle est vérifiée graphiquement à l'aide d'un diagramme de Quantile-Quantile, les résidus pour les paramètres de rugosité sont bien distribués le long de la droite figurant sur le tracé, donc l'hypothèse de normalité est acceptable. La figure 3.7 montre le diagramme Quantile-Quantile de la rugosité arithmétique (S_a) de la surface d'aluminium. La distribution de données suit une distribution normale. Pour l'hypothèse d'homogénéité des variances, elle est également vérifiée graphiquement à l'aide d'un graphique de Scale-location, les points sont proches de la courbe de régression locale, ce qui signifie que les variances sont réparties de façon homogène.

Ensuite, on calcule le rapport F et la valeur P des paramètres de rugosité avec un seuil de signification α de 0,05. Le tableau 3.3 résume les valeurs obtenues. Selon le tableau de Fisher-Snedecor, la valeur F critique est 3,77. Les valeurs F des paramètres de rugosité sont inférieures à la valeur critique, donc l'hypothèse nulle H_0 de l'hypothèse de l'égalité ne peut pas être rejetée. Les valeurs de P obtenus pour ces paramètres de rugosité sont très supérieures au seuil de signification de 0,05, ce qui confirme la conclusion obtenue précédente par calcul de rapport F.

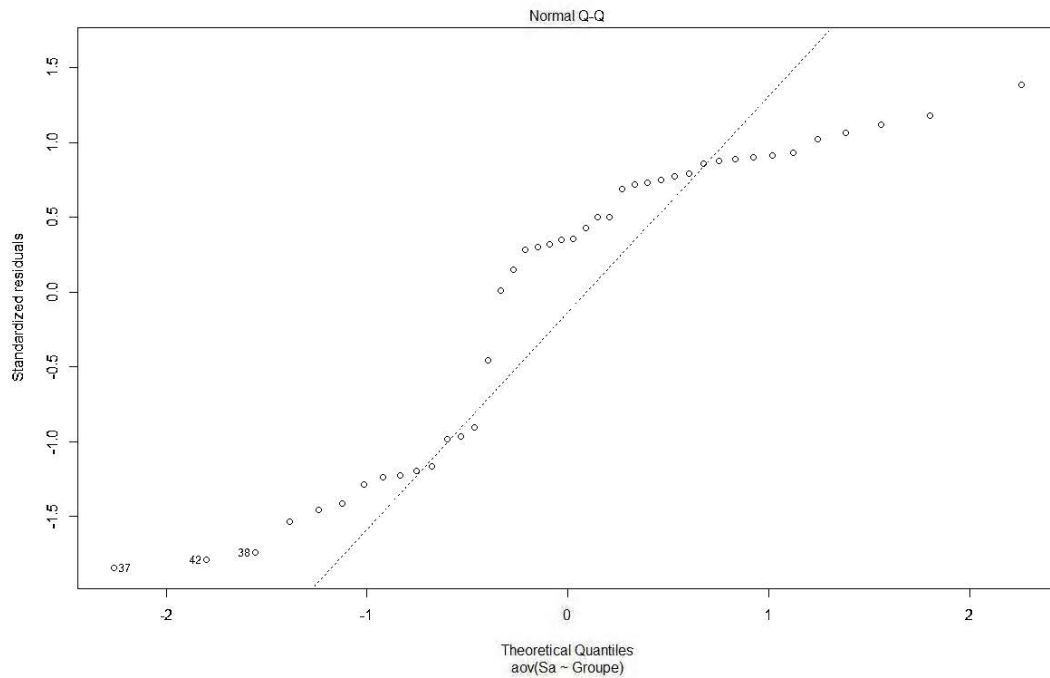


Figure 3.7 Le digramme Quantile-Quantile de la rugosité arithmétique (Sa).

Pour conclure, on observe que les différents traitements de surface changent des paramètres de rugosité. Cependant, en utilisant l'ANOVA, l'hypothèse nulle H_0 ne peut pas être rejetée. Rien ne permet de dire que les moyennes des paramètres de surface ne sont pas égales, car les moyennes des paramètres de rugosité obtenus par les différents traitements de surface ne diffèrent pas de façon significative.

Tableau 3.3. Résultats des analyses de variance. (k=6, n=42, $\alpha=0,05$)

ddl=36	Sa	Sq	Sdr
$F_{(5, 36)}$	0,974	1,062	0,215
$P (Pr>F)$	0,33	0,309	0,646

3.3.3.2 Comparaison multiple

La figure 3.8 illustre les boîtes à moustaches (seuil de signification α de 0,05) de Sa et Sq pour l'aluminium ayant subi différents traitements de surface.

La boîte à moustaches de la variable Sa ressemble à celle de Sq. Par rapport à la surface de l'aluminium non traitée (groupe bc en statistique), les abrasions unidirectionnelles de surface ont augmenté la rugosité arithmétique (Sa) et quadratique (Sq) de l'aluminium. D'après la comparaison multiple, la surface d'aluminium traitée par abrasion unidirectionnelle de #120 (groupe a en statistique) possède de plus grandes valeurs de Sa et de Sq. On peut donc conclure que l'abrasion #120 est le traitement optimal pour l'aluminium afin d'atteindre la meilleure rugosité surfacique. Selon les résultats obtenus, les abrasions unidirectionnelles de #80, #180 et #320 appartiennent statistiquement au groupe ab, leurs valeurs de Sa et Sq ne diffèrent pas de façon significative. Également, on trouve que la surface de l'aluminium traitée par voie chimique (groupe c en statistique) possède les plus petites valeurs de Sa et Sq, donc, ce traitement réduit la rugosité de l'aluminium.

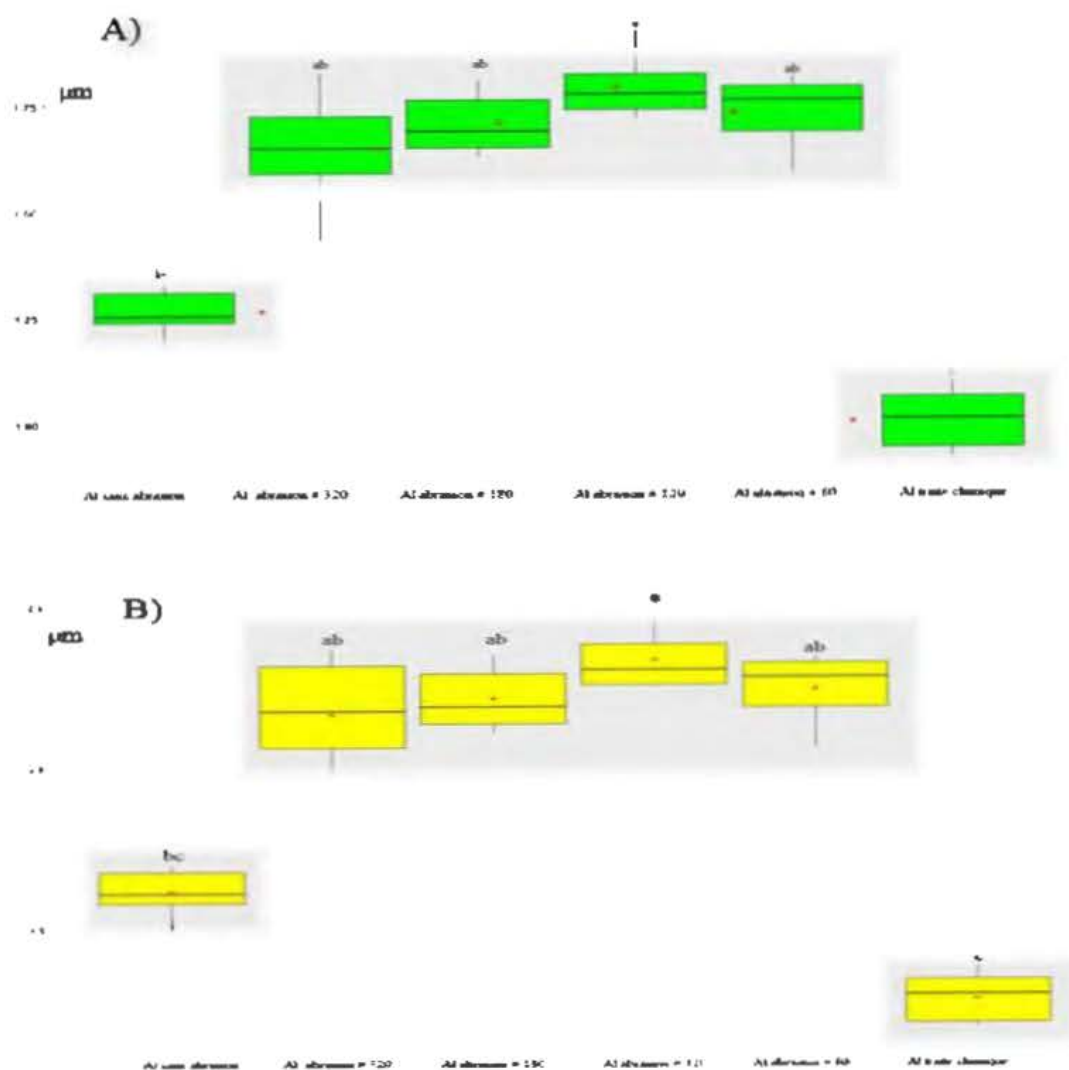


Figure 3.8 Boîtes à moustaches pour les paramètres de rugosité : A) La rugosité arithmétique (S_a); B) La rugosité quadratique (S_q),

La figure 3.9 illustre la boîte à moustaches du facteur de Wenzel. Par rapport à la surface de l'aluminium non traitée (groupe b en statistique, figure 3.8), les abrasions unidirectionnelles de surface ont augmenté la surface réelle de l'aluminium. Les abrasions unidirectionnelles de surface de # 80, # 120, #180 et #320 sont tous inclus dans le groupe statistique a. Ces valeurs de Wenzel ne diffèrent pas de façon

significative. En plus, les boîtes du facteur de Wenzel pour les surfaces abrasées sont immenses, dû à la difficulté d'appliquer idéalement de l'abrasion unidirectionnelle aux surfaces. Également, on trouve que le facteur de Wenzel de la surface de l'aluminium traitée par voie chimique (groupe b en statistique) est légèrement inférieur à celui de la surface non traitée.

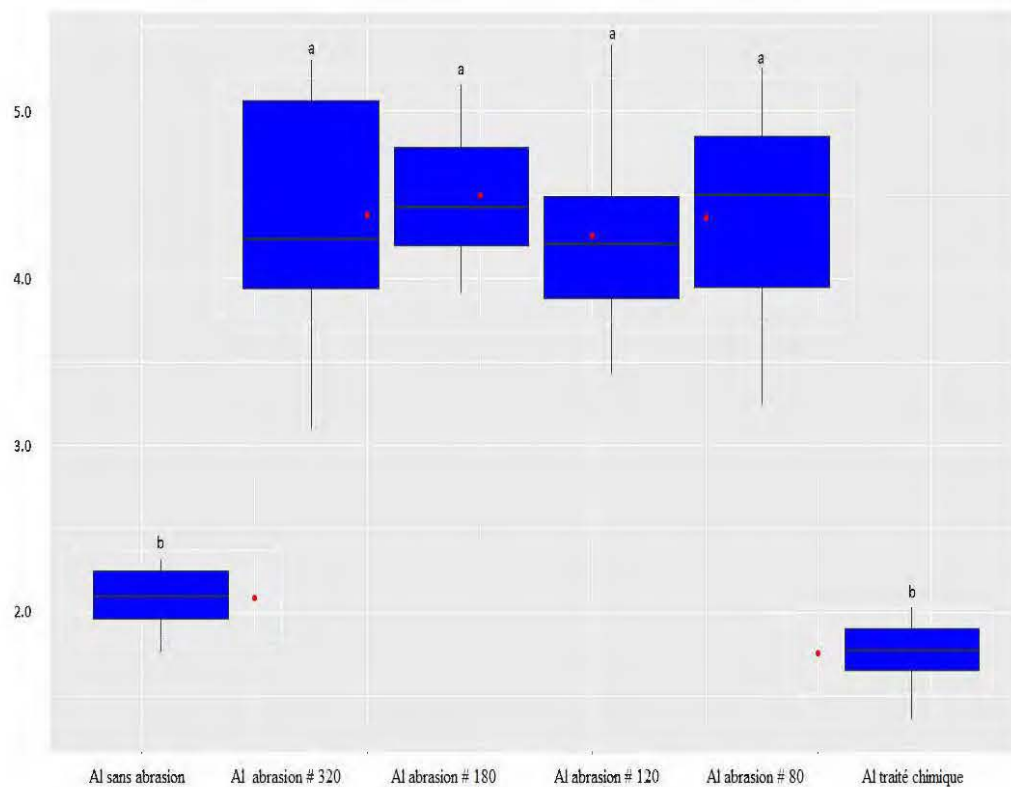


Figure 3.9 La boîte à moustache du facteur de Wenzel.

3.3.3.3 Analyse de composantes principales (PCA)

Les données des groupes 3 à 7 du test d'adhésion proviennent toutes de CBP ayant subi une abrasion de surface #180 pour faire apparaître les fibres de bois à la surface. Seulement les surfaces de l'aluminium ayant subi différents traitements de surface et ayant des paramètres de rugosité surfacique différents sont utilisées pour l'analyse en

composantes principales. Le tableau 3.4 résume les moyennes des paramètres de rugosité et la force d'adhésion pour l'analyse en composantes principales.

Tableau 3.4 Les moyennes des paramètres de rugosités et la force d'adhésion.

Groupe		Sa	Sq	Sdr	Wenzel	Force
		μm	μm	Adim	Adim	kN
3	CBP (50%) abrasion #180 – Al – CBP (50%) abrasion #180	1,262	1,613	1,042	2,042	0,299
4	CBP (50%) abrasion #180 – Al abrasion #320 – CBP (50%) abrasion #180	1,646	2,135	2,188	3,188	0,367
5	CBP (50%) abrasion #180 – Al abrasion #180 – CBP (50%) abrasion #180	1,706	2,211	2,247	3,247	0,478
6	CBP (50%) abrasion #180 – Al abrasion #120 – CBP (50%) abrasion #180	1,791	2,321	2,254	3,254	0,787
7	CBP (50%) abrasion #180 – Al abrasion #80 – CBP (50%) abrasion #180	1,731	2,240	2,184	3,184	0,619

La figure 3.10 montre le diagramme PCA, et ses données tracées par le logiciel CANOCO 5. La projection de Wenzel (interception OA) est positive, donc la relation entre le facteur de Wenzel et la force d'adhésion est une corrélation positive. La valeur de projection de Sa est quasiment identique à celle de Sq, nous pouvons la traiter donc

comme une variable $S\phi$. La projection de Wenzel est plus petite que celle de $S\phi$. Malgré le fait que $S\phi$ est fortement lié avec le facteur de Wenzel, le paramètre d'amplitude de $S\phi$ a un impact prédominant sur la force d'adhésion.

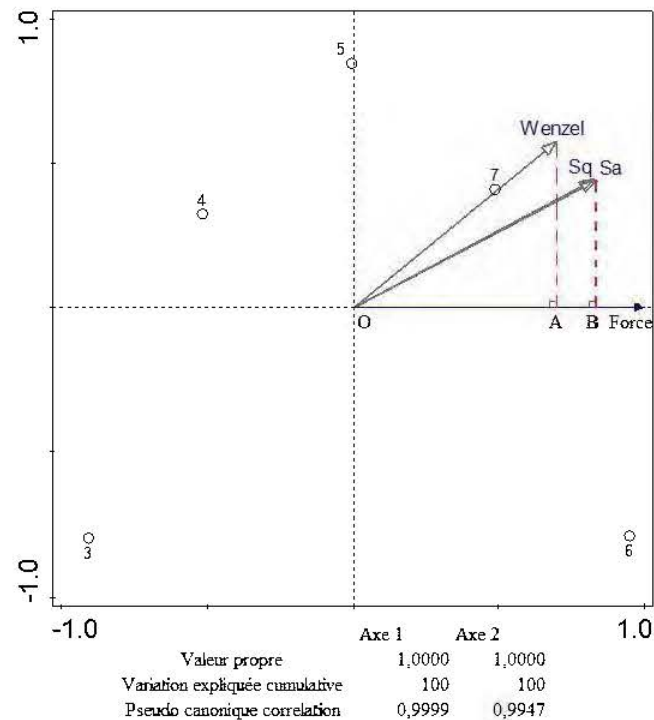


Figure 3.10 Diagramme de l'analyse en composantes principales entre les paramètres de rugosité et la force d'adhésion.

3.3.3.4 Analyse de régression

Le tableau 3.5 illustre les résultats de l'évaluation des modèles. Le modèle 4 possède une valeur de K équivalent à 5, ce qui signifie que tous les 5 groupes de paramètres de rugosité et leur force d'adhésion sont acceptables pour ce modèle. En plus sa valeur de Δ_{AICc} est la plus petite parmi ces 4 modèles et sa valeur de $AICc$. Wt , égale à 1, est la plus grande parmi ces 4 modèles, autrement dit, la probabilité de ce modèle est 100%. Le modèle 4 permet d'expliquer tous les phénomènes pour établir la relation

entre la rugosité arithmétique S_a , le facteur de Wenzel et la force d'adhésion. Par la suite, le modèle 4 est utilisé pour l'analyse de régression. La formule de relation prend la forme suivante :

$$F=A*S_a+B*R+C*S_a*R+D \quad (\text{Éq. 3.1})$$

Où :

F représente la force d'adhésion en N.

S_a représente la rugosité arithmétique en μm .

R représente le facteur de Wenzel sans unité.

A, B, C et D sont les coefficients associés.

Tableau 3.5 Les résultats de la sélection de modèles basés sur l'AIC.

	K	AICc	Delta_AICc	AICcWt	Cum.Wt	LL
modèle 4	5	-78,27	0,00	1	1	14,13
modèle 1	3	22,20	100,47	0	1	3,90
modèle 2	3	24,36	102,63	0	1	2,82
modèle 3	4	Inf	Inf	0	1	13,63

Avec:

K : le nombre de paramètres estimés pour chaque modèle (Mazerolle, 2016).

Delta_AICc: le composant AIC delta approprié (Mazerolle, 2016).

AICC.Wt: les poids d'Akaike, également appelés "probabilités modèles"(Mazerolle, 2016).

Cum.Wt: les poids cumulés d'Akaike (Mazerolle, 2016).

Les coefficients associés sont calculés par le logiciel R, on a donc :

A=1517,0; B=-1737,5; C=546,5; D=524,2;

On peut récrire l'équation 3.1 comme :

$$F = 1517 * Sa - 1737,5 * R + 546,5 * Sa * R + 524,2 \quad (\text{Éq. 3.2})$$

La figure 3.11 compare les forces mesurées par expérience et les forces calculées à partir du modèle de régression. Le coefficient de régression R^2 ajusté, obtenu utilisant le logiciel R est égal à 0,99. Donc, ce modèle a un pouvoir de prédiction fort pour prédire la force d'adhésion en utilisant la rugosité arithmétique Sa et le facteur de Wenzel R.

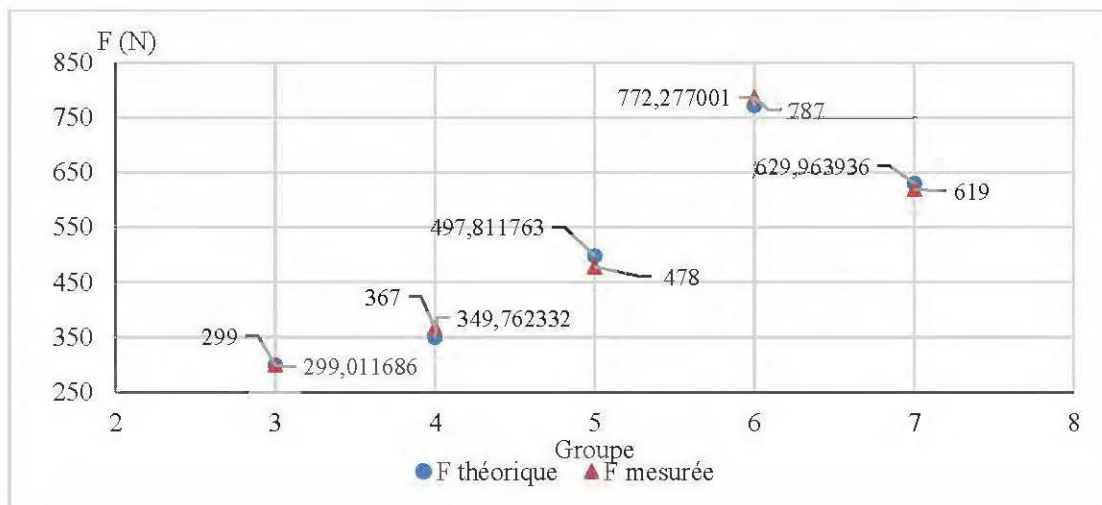


Figure 3.11 Comparaison des forces mesurées et des forces prédites par modèle de régression.

3.4 Renforcement du CBP par fibres de carbone

3.4.1 La morphologie des CBPs renforcés par des fibres de carbone

La figure 3.12 représente une surface d'un CBP renforcé par des fibres de carbone. Avec le microscope confocal, on observe des tiges de fibres de carbone apparues à la surface d'un CBP. Donc, il est évident que la présence de fibres de carbone a modifié la morphologie des CBP et pourra changer les paramètres de rugosité surfacique.



Figure 3.12 La surface d'un CBP renforcée par des fibres de carbone. (50x)

Les données des paramètres de rugosité surfacique des différentes surfaces de CBP sont dans l'annexe III. La figure 3.13 illustre le résultat de comparaison multiple de la rugosité arithmétique S_a des différentes surfaces de CBP par la méthode de Tukey DSH.

Les rugosités arithmétiques S_a de différentes surfaces de CBP sans fibres de carbone (groupes a) sont très inférieures à celles de CBP avec fibres de carbone (groupes b). L'ajout de fibres de carbone augmente significativement la rugosité arithmétique de surface.

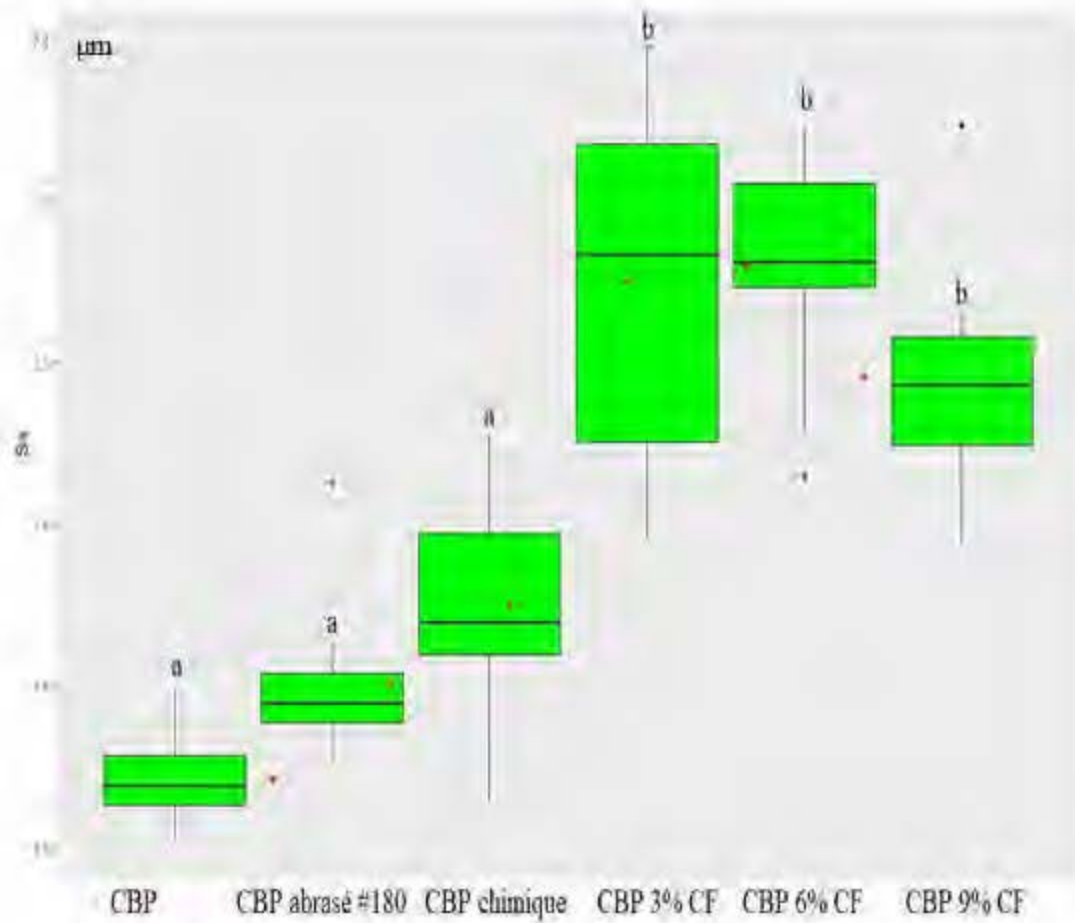


Figure 3.13 La comparaison multiple de la rugosité arithmétique des surfaces de CBP par le test LSD de Tukey.

3.4.2 Les propriétés mécaniques des CBPs renforcés par des fibres de carbone

Les propriétés de flexion des CBPs renforcés par des fibres de carbone sont énumérées dans l'annexe IV et les propriétés de traction des CBPs renforcés par des fibres de carbone sont énumérées dans l'annexe V. La figure 3.14 compare la résistance à la flexion et la résistance à la traction des CBPs renforcés par des fibres de carbone et les propriétés mécaniques du bois.

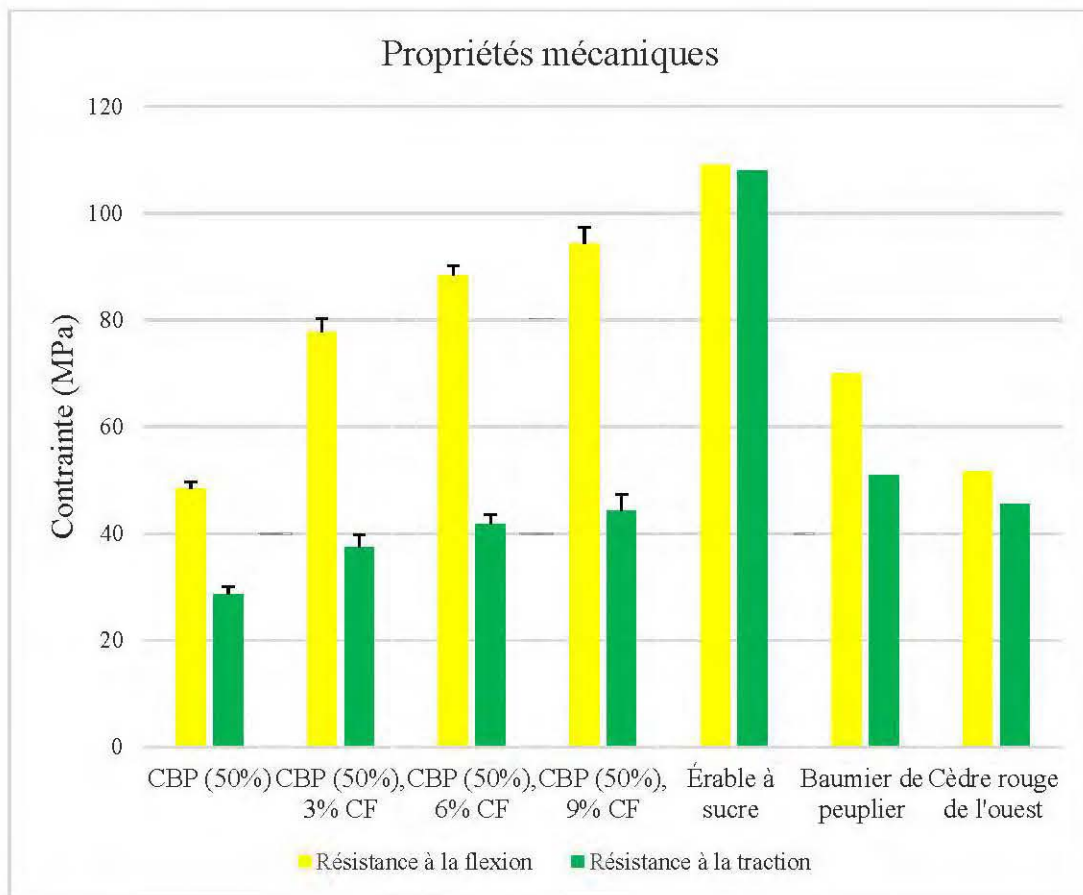


Figure 3.14 Les résistances mécaniques de CBP renforcés par des fibres de carbone.

L'intégration des fibres de carbone a renforcé les propriétés mécaniques des CBPs. Par rapport aux CBP sans fibres de carbone, avec 3%, 6% et 9% (% en poids)

respectivement de fibres de carbone, le module d'élasticité en flexion a augmenté de 42%, 78% et 121% (Annexe IV). Le module de traction (MOE) des CBP a augmenté de 68 %, 103 % et 149 %.(Annexe V)

Avec 3%, 6% et 9% de fibres de carbone, la résistance à la flexion des CBPs a augmenté de 61%, 83% et 95% respectivement, la résistance à la traction des CBPs a augmenté de 30%, 46% et 54% respectivement. Pour prédire la résistance à la flexion et la résistance à la traction pour un CBP avec une certaine teneur en fibres de carbone on utilise un modèle logarithmique en utilisant l'équation 3.3.

$$\Delta\sigma = a * \ln(x) + b \quad (\text{Éq. 3.3})$$

Avec :

$\Delta\sigma$ représente la différence entre la contrainte d'un CBP de x % de fibres de carbone et la contrainte d'un CBP sans fibres de carbone, elle est en MPa.

a,b sont des coefficients empiriques.

x est la teneur de fibres de carbone dans le CBP. Elle varie de 0 à 1.

En appliquant les données, l'équation 3.4 représente la différence de contrainte de flexion et l'équation 3.5 représente la différence de contrainte de traction.

$$\Delta\sigma_{flex} = 15,12 * \ln(x) + 82,47 \quad (\text{Éq. 3.4})$$

$$\Delta\sigma_{trac} = 6,27 * \ln(x) + 30,71 \quad (\text{Éq. 3.5})$$

Donc, on trouve la formule de la résistance à la flexion d'un CBP renforcé par fibres de carbone. (Éq. 3.6). On trouve également l'équation de la résistance à la traction d'un CBP renforcé par fibres de carbone. (Éq. 3.7)

$$\Delta\sigma_{flex} = \Delta\sigma_{flex} + \sigma_{flex\ 0\% CF} = 15,12 * \ln(x) + 130,84 \quad (\text{Éq. 3.6})$$

* $\sigma_{flex\ 0\% CF}$ représente la résistance à la flexion d'un CBP sans fibres de carbone. Elle est égale à 48,37 MPa.

$$\Delta\sigma_{trac} = \Delta\sigma_{trac} + \sigma_{trac\ 0\% CF} = 6,28 * \ln(x) + 59,41 \quad (\text{Éq. 3.7})$$

** $\sigma_{trac\ 0\% CF}$ représente la résistance à la rupture d'un CBP sans fibres de carbone. Elle est égale à 28,70 MPa.

Le coefficient de détermination (R^2) de l'équation 3.14 est égal à 0,998. Le R^2 de l'équation 3.7 est égal à 1. Quand x est proche de 0, on sait que $\ln(0)$ est infini au négatif, l'équation 3.6 et l'équation 3.7 ne sont pas valables. C'est-à-dire, quand le CBP ne contient pas de fibres de carbone, les deux équations ne s'appliquent pas. La plage de validité de ces équations est de 3% à 9%, en masse, de fibres de carbone dans un CBP.

Les propriétés mécaniques de différents types de bois sont mesurées avec une teneur en humidité de 12%. (Green et al., 1999). L'érable à sucre est un bois feuillu, il possède une excellente résistance à la flexion et une excellente résistance à la traction parmi les bois de feuillus. Malgré le fait que les CBP sont intégrés par des fibres de carbone, leurs propriétés mécaniques restent inférieures à celles du bois d'érable à sucre. Cependant, la résistance à la flexion des CBPs renforcés par fibres de carbone est supérieure à celle de bois de peuplier (bois de feuillu) et à celle de bois de cèdre (bois

de résineux), la résistance à la traction des CBPs renforcés par des fibres de carbone est au même niveau que le bois de peuplier ou le bois de cèdre.

3.4.2 Renforcement par l'ajout d'une couche d'aluminium

L'essai de flexion et l'essai de traction sont réalisés pour les composites sandwich CBP-Al-CBP. Le tableau 3.6 résume les propriétés de flexion des composites sandwich énumérées dans l'annexe VI. Kilic et al. (2009) ont mentionné que la rugosité a un impact sur les propriétés de composite à structure sandwich. Donc, le test de Tukey DSH est réalisé sur les résultats des propriétés mécaniques obtenus pour évaluer l'impact de la rugosité de surface sur les propriétés mécaniques des composites sandwich CBP-Al-CBP.

Les composites sandwich PP-Al-PP (groupe 1) sont les références. Dû à la polarité de la surface de PP, l'adhésion entre le PP et l'aluminium est mauvaise, le délaminage a lieu à un niveau de charge faible pour l'essai de flexion à trois points. On observe le même phénomène pour le groupe 2, où les traitements de surface ne sont pas effectués pour les sandwichs CBP-Al-CBP. La mauvaise adhésion entre la couche d'aluminium et la couche de CBP entraîne un délaminage inattendu avant la rupture au centre des composites sandwich.

Selon les résultats obtenus des groupes 3 à 8, le module d'élasticité et la résistance à la flexion des composites sandwich CBP-Al-CBP ne sont pas renforcés par rapport à celles des CBP. La couche du noyau en aluminium est un milieu de transfert de contraintes. Cependant, une faible variation de la résistance à la flexion des composites sandwich est observée. Cette variation peut provenir de différentes sources. D'abord, on a montré que les traitements de surface ont des impacts sur la qualité d'adhésion.

Tableau 3.6 Les propriétés de flexion des composites sandwich CBP-Al-CBP.

Groupe		Module (GPa)	σ max (MPa)	Mode de rupture
1	PP – Al – PP	1,222 _b *	18,13 _b	I**
2	CBP (50%) – Al – CBP (50%)	3,082 _a	20,89 _b	I
3	CBP (50%) abrasion #180 – Al – CBP (50%) abrasion #180	3,994 _a	48,79 _a	II***
4	CBP (50%) abrasion #180 – Al abrasion #320 – CBP (50%) abrasion #180	3,960 _a	49,86 _a	II
5	CBP (50%) abrasion #180 – Al abrasion #180 – CBP (50%) abrasion #180	4,097 _a	48,59 _a	II
6	CBP (50%) abrasion #180 – Al abrasion #120 – CBP (50%) abrasion #180	3,218 _a	41,78 _{ab}	II
7	CBP (50%) abrasion #180 – Al abrasion # 80 – CBP (50%) abrasion #180	3,107 _a	40,65 _{ab}	II
8	CBP (50%) – Al chimique – CBP (50%) chimique	4,050 _a	47,44 _a	II

* : la lettre de l'indice est le type de classement obtenu en utilisant la comparaison multiple de Tukey DSH.

** : Le délaminage entre la couche de CBP et la couche d'aluminium.

*** : La rupture au centre du composite sandwich.

La qualité d'adhésion influence directement la propriété des composites sandwich. (Segovia Abanto, 2018). En même temps, la rugosité surfacique causée par différents traitements de surface peut être considérée comme des microfissures. Donc, la résistance à la flexion sera influencée par la rugosité des composites sandwich. Cependant, le modèle de Griffith est limité dans le cas de matériaux homogènes. Pour comprendre la mécanique de rupture des matériaux composites non homogènes tels

que le CBP, des développements de modèle de Griffith seront nécessaires. Selon les résultats obtenus du test de Tukey DSH, le module d'élasticité et la résistance à la flexion de groupes classés en ab (groupe 6 et groupe 7) sont légèrement inférieurs à celles de groupes classés en a. L'abrasion unidirectionnelle a baissé le module d'élasticité et la résistance à la flexion des composites sandwich.

Pour étudier les propriétés de traction des CBPs des composites sandwich, on applique la même démarche que celle de flexion. Le tableau 3.7 résume les données d'essai de traction des composites sandwich (Annexe VII) et les résultats de test de Tukey DSH.

Selon les résultats obtenus, le module d'élasticité en flexion des composites sandwich CBP-Al-CBP est approximativement 12 GPa. Il est très supérieur à celui du CBP (2,6 GPa). Les modules de traction (MOE) des CBPs renforcés par des fibres de carbone sont 4,4 GPa, 5,3 GPa et 6,5 GPa pour 3%, 6% et 9% de fibres de carbone. Ils sont encore inférieurs à celui des composites sandwich. Par rapport au bois, l'érable à sucre possède un module d'élasticité de 11,5 GPa (Dagenais, 2007), légèrement inférieur à celui des composites sandwich.

Selon les résultats obtenus, le module d'élasticité en flexion des composites sandwich CBP-Al-CBP est approximativement 12 GPa. Il est très supérieur à celui du CBP (2,6 GPa). Les modules de traction (MOE) des CBPs renforcés par des fibres de carbone sont 4,4 GPa, 5,3 GPa et 6,5 GPa pour 3%, 6% et 9% de fibres de carbone. Ils sont encore inférieurs à celui des composites sandwich. Par rapport au bois, l'érable à sucre possède un module d'élasticité de 11,5 GPa (Dagenais, 2007), légèrement inférieur à celui des composites sandwich.

Tableau 3.7 Les propriétés de traction des composites sandwich CBP-Al-CBP.

Groupe		MOE (GPa)	MOR (MPa)	Mode de rupture
1	PP – Al – PP	9,85 _b	29,98 _b	I
2	CBP (50%) – Al – CBP (50%)	11,3 _{ab}	43,885 _a	II
3	CBP (50%) abrasion #180 – Al – CBP (50%) abrasion #180	11,9 _{ab}	42,292 _a	II
4	CBP (50%) abrasion #180 – Al abrasion #320 – CBP (50%) abrasion #180	12,2 _{ab}	43,006 _a	II
5	CBP (50%) abrasion #180 – Al abrasion #180 – CBP (50%) abrasion #180	12,5 _a	42,836 _a	II
6	CBP (50%) abrasion #180 – Al abrasion #120 – CBP (50%) abrasion #180	11,9 _{ab}	42,348 _a	II
7	CBP (50%) abrasion #180 – Al abrasion #80 – CBP (50%) abrasion #180	11,4 _{ab}	44,314 _a	II
8	CBP (50%) – Al chimique – CBP (50%) chimique	12,9 _a	44,108 _a	II

Selon les résultats des groupes 2 à 8, la variation de résistance à la traction n'est pas significative à un seuil de signification α de 0,05. Donc, l'adhésif résiste aux cisaillements entre la couche d'aluminium et la couche de CBP durant l'essai de traction et les traitements de surface influencent peu la résistance à la traction du composite sandwich. Les composites sandwich possèdent une résistance à peu près identique à celle des CBPs renforcés par 6% ou 9% de fibres de carbone.

3.4.3 Analyse du coût de production

La production de CBP offre une piste pour la valorisation des résidus de procédé de sciage et pour le recyclage des déchets thermoplastiques. Les CBP possèdent des propriétés mécaniques remarquables : ils sont durables, résistants à l'humidité, aux intempéries et aux insectes; Ils possèdent une bonne stabilité dimensionnelle ; ils sont faciles à mettre en forme utilisant des procédés d'extrusion ou d'injection ; ils sont biosourcés et recyclables. Et pour les CBP renforcés par des fibres de carbone ou renforcés en préparant un composite sandwich, ils ont de bonnes propriétés mécaniques. Cependant, il y a des facteurs à considérer pour réussir le passage d'une production des CBPs renforcés à l'échelle de laboratoire vers une échelle industrielle. On s'inspire de l'idée du triangle de contraintes standard de gestion de projet. (Ekeocha & Ogbonnaya, 2018) La figure 3.15 représente le triangle modifié pour le développement d'un produit CBP renforcé. Les quatre différents aspects (l'application, la performance, l'environnement et la compétitivité) d'un CBP renforcé construisent ce triangle.

La compétitivité d'un produit CBP renforcé dépend de plusieurs facteurs. Parmi ces facteurs, le prix joue un rôle essentiel. L'analyse de coût est effectuée pour savoir la faisabilité de deux méthodes de renforcement de CBP. Le tableau 3.8 illustre les prix des matières premières, le prix de production de composites sandwich et le prix de CBP renforcés par des fibres de carbone.

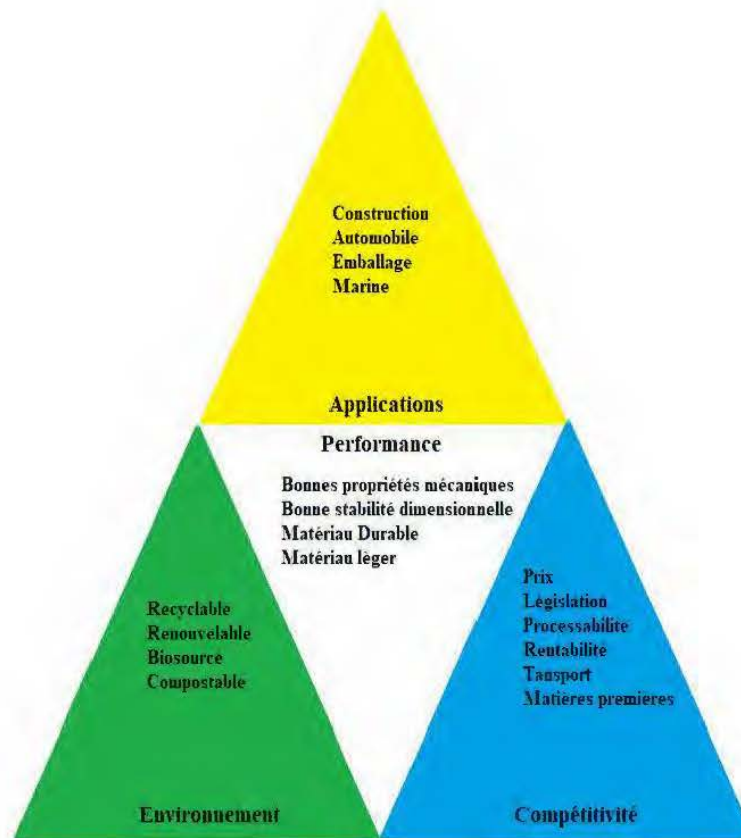


Figure 3.15 Le triangle de développement d'un produit CBP renforcé.

Avec 3%, 6% et 9% de fibres de carbone, le coût de production de CBP augmente de 70%, 150% et 230%. Intégrer les fibres de carbone dans les CBP augmente significativement leurs coûts de production. À partir de l'analyse coût-performance (cost-performance analysis), on propose une intégration de 6% de fibres de carbone dans les CBP. Le coût de production des CBPs avec 6% de fibres de carbone est 2,5 fois du coût de production des CBPs sans fibres de carbone. Les propriétés mécaniques des CBPs renforcés par fibres de carbone sont mieux que certains types de bois de résineux. Donc, la balance entre la performance des CBPs et le coût de production est favorable.

Tableau 3.8 Les prix de matières premières et des CBPs renforcés.

	Matière	Prix (US \$ / kg)	Augmentation du coût (%)
Matières premières	Fibres du bois	0,3-0,6	/
	PP	1	/
	MAPP	12	/
	Fibres de carbone	22	/
	Aluminium	1,6	/
	Époxy	30 (US \$ / m2)	/
CBP renforcé	CBP (50%)	0,8	0
	CBP 3 % CF	1,35	70
	CBP 6 % CF	1,99	150
	CBP 9 % CF	2,62	230
	CBP-Al-CBP	0,96	20

Selon l'analyse de coût de production, le renforcement des propriétés mécaniques en préparant les composites sandwich CBP-Al-CBP est un choix peu coûteux. La quantité d'aluminium utilisé dans les composites sandwich est approximativement 15% en poids. Sans compter la perte et les frais additionnelles (l'électricité, l'espace et les équipements pour pressage à chaud, le main d'oeuvre) pour produire des composites sandwich CBP-Al-CBP, l'augmentation du coût de production est approximativement 10%. On multiplier un facteur de coût additionnel équivalent à 2. Donc, l'augmentation total du coût de production est 20%. Pour les composites sandwich CBP-Al-CBP, la

résistance à la flexion n'est pas améliorée significativement par rapport à celle de CBP. Segovia Abanto, 2018 a proposé de préparer les composites sandwich sous la forme d'Al-CBP-Al. Cette forme de composite sandwich Al-CBP-Al possède une rigidité élevée qui dépend notamment de la rigidité de la mince couche d'aluminium, elle possède une excellente résistance à la flexion et à la traction.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

4.1 Conclusions

Pour le volet traitant de l'amélioration de l'adhésion du CBP avec de l'aluminium, la détection de fibres d'érable par la solution o-toluidine bleue montre que les fibres d'érable sont rarement présentes à la surface des CBP, l'hypothèse que l'étape d'extrusion et d'injection des CBPs mène à un enrobage des fibres d'érable par le plastique PP est affirmée. En appliquant les différents traitements de surface par voie mécanique (les différentes abrasions unidirectionnelles) et par voie chimique, les fibres d'érable protégées par le plastique PP sont apparues à la surface du CBP. Les changements de rugosité et de la composition chimique de la surface du CBP mènent à une adhésion améliorée entre le CBP et l'aluminium. Le groupe qui a subi une abrasion unidirectionnelle #120 de l'aluminium et une abrasion unidirectionnelle #180 du CBP possède la meilleure adhésion entre le CBP et l'aluminium. Sa force d'adhésion est 787 N, soit une augmentation de 288% par rapport au groupe qui n'a pas eu de traitements de surface.

Les surfaces avec une dimension limitée sont obtenues par microscopie confocale. La modélisation de la morphologie des surfaces est réalisée, à l'aide des six paramètres de rugosité surfacique (S_a , S_q , S_{sk} , S_{ku} , S_{tr} , S_{dr}) indiqués dans la norme ISO 25178. On observe qu'une abrasion unidirectionnelle (#320, #180, #120 ou #80) augmente la

rugosité arithmétique (S_a) et quadratique (S_q), et le rapport de surface interfaciale développée (S_{dr}) des surfaces des CBPs et de l'aluminium. Par la suite, l'analyse de variance nous indique que les traitements de surface changent les paramètres de rugosité. Cependant, ces changements ne sont pas significatifs. Malgré le fait que les paramètres de rugosité des différents traitements de surface ne sont pas significativement différents, on a réussi à les séparer dans différents groupes statistiques à l'intérieur desquels les paramètres sont identiques statistiquement. L'analyse en composantes principales (PCA) est utilisée pour établir le lien entre les paramètres de rugosité et la force d'adhésion. La rugosité arithmétique (S_a) et le facteur de Wenzel (R) sont corrélés positivement avec la force d'adhésion. Finalement, l'analyse de régression avec la sélection de modèles basée sur le critère d'Akaike (AIC) confirme que la rugosité arithmétique (S_a) est corrélée avec le facteur de Wenzel (R) et que la rugosité arithmétique (S_a) et le facteur de Wenzel (R) ont des impacts synergiques sur la force d'adhésion. Les paramètres de rugosité tels que S_a , S_q et S_{dr} permettent de prédire la qualité de l'adhésion.

Pour le volet qui consiste à renforcer les propriétés mécaniques. Les propriétés mécaniques des CBP sont renforcées par l'intégration de fibres de carbone dans le CBP ou par la préparation de composites sandwich CBP-Al-CBP. L'objectif général de concevoir un CBP structural est atteint en intégrant des fibres de carbone. Les différents essais de procédé d'intégration de fibres de carbone dans les CBP (injection directe, extrusion double, extrusion simple) ont confirmé qu'une extrusion simple permet d'avoir une bonne distribution de fibres de carbone ainsi que plus d'interactions de fibres de carbone avec l'agent MAPP. Cette méthode d'intégration diminue également la probabilité que des bulles d'air soient présentes à l'intérieur du CBP et favorise les propriétés mécaniques (module d'élasticité en flexion, résistance à la flexion, MOE et MOR) du CBP. En appliquant la méthode d'extrusion simple, on a intégré une faible quantité de fibres de carbone dans les CBP. Avec 3%, 6% et 9% (% en poids) de fibres de carbone, le module d'élasticité en flexion a augmenté de 42%, 78% et 121%,

respectivement, la résistance à la flexion du CBP a augmenté de 61%, 83%, et 95%, respectivement, le module de traction (MOE) du CBP a augmenté de 68%, 103% et 149%, respectivement, la résistance à la traction (MOR) du CBP a augmenté de 30%, 45%, et 54% respectivement. Selon l'analyse de coût-performance, une intégration approximative de 6% de fibres de carbone dans les CBP est proposée.

En préparant des composites sandwich de CBP-Al-CBP, la couche de noyau en aluminium transfère des contraintes. Par conséquent, le changement du module d'élasticité en flexion et la résistance à la flexion est négligeable. Donc, l'amélioration des propriétés de flexion n'est pas atteinte. Cependant, les propriétés de tractions des composites sandwich sont améliorées de façon significative par rapport au CBP. Les composites sandwich possèdent un module à la rupture (MOE) d'environ 12 GPa, comparable à celui du bois d'érable (12% de teneur en humidité). La résistance à la rupture (MOR) dépasse certains types de bois de feuillus. L'objectif de concevoir un CBP structural est partiellement atteint.

En utilisant les comparaisons multiples Tukey DSH avec un seuil de signification α de 0,05, on montre que les traitements de surface influencent la rugosité surfacique et par microscopie confocale on observe la présence de microfissures à la surface des CBPs et de l'aluminium. La qualité d'adhésion et les microfissures produites par des traitements de surface influencent les propriétés mécaniques des composites sandwich. La diminution de la résistance à la flexion et la diminution du module d'élasticité en flexion sont observées. Cependant, les changements des propriétés de traction (MOE et MOR) causés par différentes rugosités ne sont pas évidents. Il n'est pas évident d'aller plus profondément pour établir la relation entre la qualité d'adhésion et les propriétés mécaniques de composites sandwich et de la justifier, dû à la complexité du problème concerné.

4.2 Perspectives

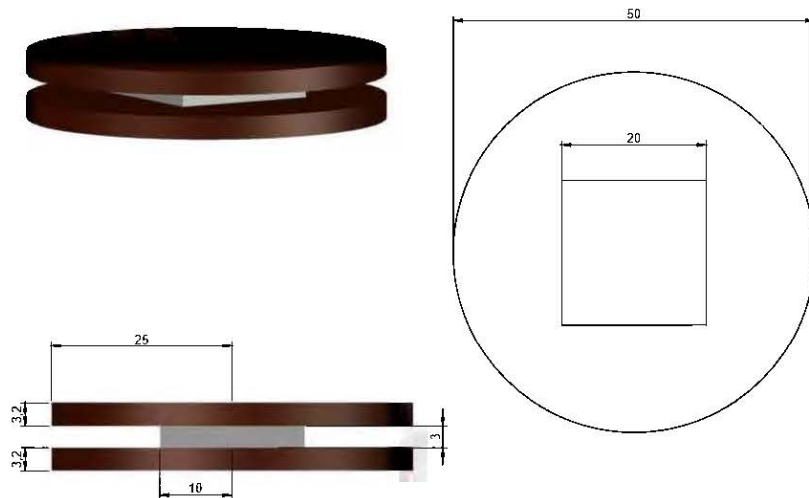
Cette recherche a offert des méthodologies et des résultats qui pourront être largement utilisés pour les recherches dans le futur:

1. Le traitement de surface par voie chimique utilise des composés chromiques qui sont des polluants aux métaux lourds. Les traitements de surface qui permettent d'augmenter la polarité et la rugosité de surface en utilisant des composés chimiques plus écologiques sont de grand intérêt pour les applications industrielles.
2. Les abrasions unidirectionnelles sont effectuées à la surface : la relation entre les paramètres de rugosité et l'adhésion interfaciale est établie. On pourra également suivre la même démarche pour étudier les phénomènes de rugosité en effectuant des abrasions multidirectionnelles ou rotatives.
3. Effectuer une combinaison de différents traitements de surface (mécaniques et chimiques) : cette combinaison de traitements de surface pourra avoir un impact synergique sur les paramètres de rugosité surfacique.
4. Les paramètres de rugosité obtenus par microscopie confocale permettent de quantifier la surface des CBPs et de l'aluminium, cette méthode est applicable pour une large gamme de matériaux.
5. Étudier la durabilité des composites sandwich ayant subi différents traitements de surface : Les surfaces des CBPs ayant subi différents traitements sont plus sensibles à la présence d'eau en raison des fibres de bois. Les recherches concernant de nouveaux CBP conçus par une combinaison de traitement et résistant à l'eau auront un grand intérêt pour l'industrie de la construction.
6. L'analyse de coût-performance peut être utilisée pour estimer le prix des CBPs et ses produits dérivés comme les composites sandwich à base de CBP.

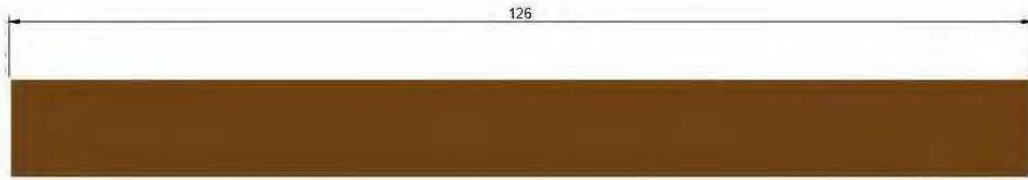
ANNEXES

ANNEXE I

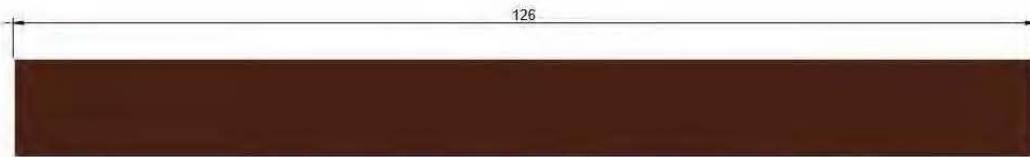
3D PROJECTION DES ÉPROUVETTES DES TESTS MÉCANIQUES.



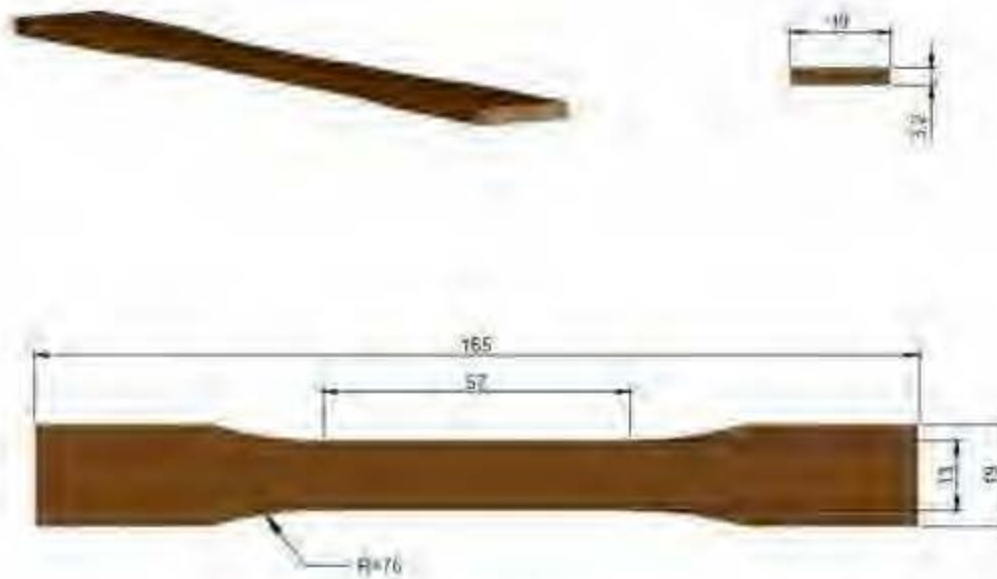
ASTM D1037 Le composite sandwich CBP-Al-CBP pour le test d'adhésion.



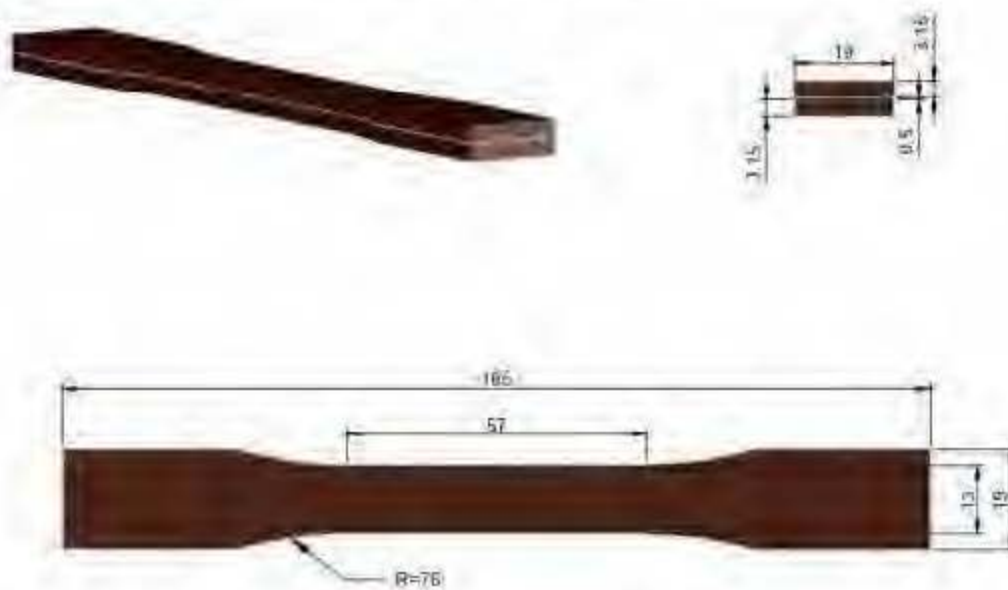
ASTM D 790 L'éprouvette de CBP pour la flexion à 3 points.



ASTM D 790 L'éprouvette du composite sandwich CBP-Al-CBP pour la flexion à 3 points.



ASTM D 638 L'éprouvette de CBP pour la traction Type I.



ASTM D 638 L'éprouvette du composite sandwich CBP-Al-CBP pour la traction Type I.

ANNEXE II

LA COMPOSITION CHIMIQUE D'ÉPOXY.

Partie résine d'époxy

Nom	CAS #	% en poids
Polyamide -C(=O)-NH-	135108-88-2	15-40
Résine Polyamide	68410-23-1	15-40
Triéthylènediamine	280-57-9	1-5
DABCO (Durcisseur)		
2,4,6-Tris (diméthylamino) méthylphénol	90-72-2	1-5
Tris-DMP (Durcisseur) ou DMP-30		

Partie durcisseur

Nom	CAS #	% en poids
Bisphénol-A- (épichlorhydrine) (Résine d'époxy DGEBA)	25068-38-6	10-30
Silice cristalline non respirable	14808-60-7	0.1-1
Noir de carbone respirable	1333-86-4	0.1-1

ANNEXE III

LES PARAMÈTRES DE RUGOSITÉ DE SURFACE.

Les paramètres de rugosité de l'Aluminium

Groupe		Échantillon	Sa (µm)	Sq (µm)	Sdr	Wenzel
1	Al sans abrasion	1	1,327	2,3	1,158	2,158
		2	1,309	2,247	1,148	2,148
		3	1,252	2,249	1,046	2,046
		4	1,305	2,302	1,101	2,101
		5	1,243	2,456	1,008	2,008
		6	1,167	2,258	0,883	1,883
		7	1,23	2,499	0,952	1,952
2	Al abrasion #320	1	1,823	2,363	2,65	3,65
		2	1,428	1,843	1,549	2,549
		3	1,567	2,033	1,854	2,854
		4	1,78	2,312	2,506	3,506
		5	1,608	2,085	2,115	3,115
		6	1,667	2,172	2,556	3,556
		7	1,647	2,316	2,086	3,086
3	Al abrasion #180	1	1,751	2,275	2,212	3,212
		2	1,664	2,153	1,957	2,957
		3	1,81	2,345	2,547	3,547
		4	1,773	2,299	2,579	3,579
		5	1,632	2,112	2,078	3,078

		6	1,686	2,185	2,235	3,235
		7	1,627	2,105	2,118	3,118
4	Al abrasion #120	1	1,78	2,3	2,237	3,237
		2	1,715	2,247	1,715	2,715
		3	1,734	2,249	1,985	2,985
		4	1,775	2,302	2,102	3,102
		5	1,863	2,456	1,896	2,896
		6	1,742	2,258	2,254	3,254
		7	1,924	2,499	2,694	3,694
5	Al abrasion #80	1	1,631	2,119	1,714	2,714
		2	1,589	2,057	1,622	2,622
		3	1,814	2,341	2,498	3,498
		4	1,785	2,318	2,23	3,23
		5	1,737	2,246	2,626	3,626
		6	1,759	2,277	2,247	3,247
		7	1,799	2,323	2,349	3,349
6	Al chimique	1	1,009	1,29	0,888	1,888
		2	0,919	1,186	0,83	1,83
		3	0,949	1,208	0,824	1,824
		4	1,098	1,38	0,962	1,962
		5	1,081	1,355	0,943	1,943
		6	1,044	1,319	1,016	2,016
		7	0,934	1,196	0,683	1,683

Les paramètres de rugosité de CBPs

Groupe		Échantillon	Sa (μm)	Sq (μm)	Sdr	Wenzel
1	CBP (50% de fibres) sans abrasion	1	1,595	2,071	2,105	3,105
		2	1,533	1,974	1,827	2,827
		3	1,5	1,942	1,847	2,847
		4	1,478	1,924	1,81	2,81
		5	1,518	1,971	1,923	2,923
		6	1,472	1,916	1,731	2,731
		7	1,406	1,825	1,579	2,579
		8	1,451	1,878	1,644	2,644
		9	1,454	1,887	1,767	2,767
		10	1,44	1,875	1,78	2,78
2	CBP (50% de fibres) abrasion #180	1	1,615	2,073	2,006	3,006
		2	1,554	2,001	1,912	2,912
		3	1,651	2,143	2,233	3,233
		4	1,614	2,074	2,062	3,062
		5	1,527	1,997	1,834	2,834
		6	1,506	1,946	1,671	2,671
		7	1,572	2,028	2,077	3,077
		8	1,557	2,009	1,979	2,979
		9	1,584	2,122	1,846	2,846
		10	1,851	2,403	2,678	3,678
3	CBP (50% de fibre) traité chimique	1	1,85	2,374	3,484	4,484
		2	1,809	2,34	3,334	4,334
		3	1,91	2,448	3,819	4,819
		4	1,451	1,883	2,159	3,159
		5	1,631	2,161	2,585	3,585
		6	1,664	2,161	2,781	3,781
		7	1,612	2,087	2,691	3,691
		8	1,663	2,156	2,828	3,828
		9	1,729	2,226	3,073	4,073
		10	1,69	2,182	2,906	3,906
4	CBP (50% de fibre) 3% CF	1	1,889	2,502	3,001	4,001
		2	2,09	2,75	4,084	5,084
		3	2,28	3,117	4,548	5,548

		4	2,247	2,962	4,921	5,921
		5	2,348	3,111	5,049	6,049
		6	2,391	3,423	4,44	5,44
		7	1,784	2,321	2,83	3,83
		8	1,904	2,49	3,22	4,22
		9	1,902	2,778	2,578	3,578
		10	2,175	2,836	4,531	5,531
5	CBP (50% de fibre) 6% CF	1	2,263	2,958	4	5
		2	2,09	2,719	4,205	5,205
		3	2,294	2,998	4,682	5,682
		4	2,103	2,784	4,221	5,221
		5	2,129	2,815	4,24	5,24
		6	1,914	2,513	3,196	4,196
		7	2,241	3,065	3,503	4,503
		8	1,861	2,423	3,166	4,166
		9	2,121	2,77	4,323	5,323
		10	2,169	2,833	4,391	5,391
6	CBP (50% de fibre) 9% CF	1	2,018	2,626	5,67	6,67
		2	1,984	2,561	5,175	6,175
		3	1,959	2,559	5,504	6,504
		4	1,882	2,467	2,15	3,15
		5	1,863	2,453	1,9	2,9
		6	1,775	2,318	1,942	2,942
		7	2,06	2,925	4,249	5,249
		8	1,949	2,551	4,287	5,287
		9	2,037	2,654	3,958	4,958
		10	2,294	2,998	4,682	5,682

ANNEXE IV

LES PROPRIÉTÉS DE FLEXION DE CBP RENFORCÉES PAR FIBRES DE CARBONE.

	Groupe	Échantillon	Module	σ max
			GPa	MPa
1	CBP 50 % de fibres	1	3,621	49,88
		2	4,012	47,13
		3	4,214	47,34
		4	3,661	47,88
		5	3,977	49,61
		\bar{X}	3,897	48,37
		s	0,251	1,29
		v	6,441	2,667
2	CBP 50 % de fibres 3 % de CF	1	5,436	76,43
		2	5,483	76,33
		3	5,397	75,28
		4	5,924	80,8
		5	5,361	79,86
		\bar{X}	5,52	77,76
		s	0,23	2,45
		v	4,17	3,5
3	CBP 50 % de fibres 6 % de CF	1	7,057	90,2

		2	6,755	89,23
		3	7,087	88,85
		4	6,824	88,39
		5	7,026	85,5
		\bar{X}	6,95	88,43
		s	0,15	1,77
		v	2,157	2
4	CBP 50 % de fibres 9 % de CF	1	8,293	96,7
		2	8,798	97,25
		3	8,991	90,32
		4	8,257	92,21
		5	8,72	95,22
		\bar{X}	8,612	94,34
		s	0,323	2,98
		v	3,75	3,16

ANNEXE V

LES PROPRIÉTÉS DE TRACTION DE CBP RENFORCÉES PAR FIBRES DE CARBONE.

Groupe	Échantillon	MOE GPa	MOR MPa	
1	CBP 50 % de fibres	1	2,828	29,361
		2	2,743	29,254
		3	2,643	28,435
		4	2,637	27,735
		5	2,257	28,114
		\bar{X}	2,622	28,58
		s	0,218	0,71
		v	8,335	2,4843
		2	CBP 50 % de fibres 3 % de CF	1
2	4,462			38,034
3	4,229			36,897
4	4,622			38,164
5	4,262			37,636
\bar{X}	4,395			37,158
s	0,159			1,2581
v	3,618			3,3859
3	CBP 50 % de fibres 6 % de CF			1

		2	5,338	41,524
		3	5,351	42,509
		4	5,483	40,182
		5	5,143	42,226
		\bar{X}	5,333	41,68
		s	0,122	0,9833
		v	2,288	2,3592
4	CBP 50 % de fibres 9 % de CF	1	6,316	42,711
		2	6,311	43,259
		3	6,862	45,194
		4	6,554	45,131
		5	6,567	45,221
		\bar{X}	6,522	44,303
		s	0,227	1,2193
		v	3,481	2,7521

ANNEXE VI

LES PROPRIÉTÉS DE FLEXION DE COMPOSITE SANDWICH CBP-AL-CBP.

Groupe	Échantillon N=5	Module (GPa)	σ max (MPa)	Mode de rupture
1	PP – Al – PP	Gpa	Mpa	I*
	1	1,28	11,93	
	2	1,275	17,83	
	3	1,285	19,13	
	4	1,123	23	
	5	1,145	18,75	
	\bar{X}	1,222	18,13	
	s	0,08	3,985	
	v	6,583	22	
2	CBP (50%) – Al – CBP (50%)			I
	1	3,102	19,88	
	2	3,169	23,97	
	3	3,034	18,64	
	4	3,178	21,55	
	5	2,925	20,41	
	\bar{X}	3,082	20,89	
	s	0,105	2,015	
	v	3,409	9,644	
3	1	4,134	48,34	II**

	CBP (50%) abrasion #180 – Al – CBP (50%) abrasion #180	2	4,243	47,47	
		3	3,844	49,1	
		4	3,917	47,81	
		5	3,888	51,24	
		\bar{X}	3,994	48,79	
		s	0,184	1,5	
		v	4,62	3,075	
4	CBP (50%) abrasion #180 – Al abrasion #320 – CBP (50%) abrasion #180	1	4,012	47,07	II
		2	3,784	55,3	
		3	4,219	48,91	
		4	3,802	51,17	
		5	3,984	46,86	
		\bar{X}	3,96	49,86	
		s	0,177	3,5	
		v	4,487	7,019	
5	CBP (50%) abrasion #180 – Al abrasion #180 – CBP (50%) abrasion #180	1	4,279	48,97	II
		2	4,357	48,85	
		3	3,924	47,28	
		4	3,912	47,2	
		5	4,013	50,67	
		\bar{X}	4,097	48,59	
		s	0,207	1,431	
		v	5,06	2,944	
6	CBP (50%) abrasion #180 – Al abrasion #120 – CBP (50%) abrasion #180	1	3,421	43,68	II
		2	3,007	38,72	
		3	3,205	42,24	
		4	3,195	41,5	
		5	3,262	42,77	
		\bar{X}	3,218	41,78	
		s	0,149	1,89	
		v	4,63	4,52	
7	CBP (50%) abrasion #180 – Al abrasion #80 – CBP (50%) abrasion #180	1	3,03	40,37	II
		2	3,154	44,43	
		3	3,312	40,94	

		4	3,034	38,05	
		5	3,004	39,49	
		\bar{X}	3,107	40,65	
		s	0,128	2,375	
		v	4,13	5,841	
8	CBP (50%) – Al chimique – CBP (50%) chimique	1	3,989	48,82	II
		2	4,219	47,26	
		3	4,043	46,09	
		4	3,977	48,17	
		5	4,022	46,86	
		\bar{X}	4,05	47,44	
		s	0,098	1,076	
		v	2,421	2,27	

*I : Le délaminage entre la couche de CBP et la couche d'aluminium.

*II : La rupture de composite sandwich au centre.

ANNEXE VII

LES PROPRIÉTÉS DE TRACTION DE SANDWICH COMPOSITE CBP-AL-CBP.

Groupe		Échantillon	MOE	MOR	Mode de rupture
		N=5	GPa	MPa	
1	PP – Al – PP	1	9,446	27,36	I*
		2	8,509	31,42	
		3	11,787	27,69	
		4	10,807	31,6	
		5	8,697	31,82	
		\bar{X}	9,8492	29,98	
		s	1,4106	2,247	
		v	14,322	7,495	
2	CBP (50%) – Al – CBP (50%)	1	10,456	43,631	II**
		2	10,536	42,21	
		3	11,927	44,149	
		4	11,272	44,77	
		5	12,307	44,663	
		\bar{X}	11,3	43,885	
		s	0,8222	1,0402	
		v	7,2763	2,3704	
3	CBP (50%) abrasion #180 – Al – CBP (50%) abrasion #180	1	11,784	41,811	II
		2	10,65	42,513	
		3	12,026	42,116	
		4	12,26	41,934	

		5	12,532	43,084	
		\bar{X}	11,85	42,292	
		s	0,726	0,5164	
		v	6,1267	1,221	
4	CBP (50%) abrasion #180 – Al abrasion #320 – CBP (50%) abrasion #180	1	12,011	43,699	II
		2	11,775	43,624	
		3	12,258	42,893	
		4	11,364	41,609	
		5	13,687	43,203	
		\bar{X}	12,219	43,006	
		s	0,8843	0,757	
		v	7,2371	1,7603	
5	CBP (50%) abrasion #180 – Al abrasion #180 – CBP (50%) abrasion #180	1	13,308	40,079	II
		2	12,618	43,861	
		3	12,495	43,32	
		4	11,934	43,696	
		5	12,106	43,222	
		\bar{X}	12,492	42,836	
		s	0,5343	1,5632	
		v	4,2774	3,6493	
6	CBP (50%) abrasion #180 – Al abrasion #120 – CBP (50%) abrasion #180	1	12,967	41,653	II
		2	11,706	43,276	
		3	11,492	43,712	
		4	11,472	39,938	
		5	12,086	43,159	
		\bar{X}	11,945	42,348	
		s	0,6226	1,5549	
		v	5,2122	3,6717	
7	CBP (50%) abrasion #180 – Al abrasion #80 – CBP (50%) abrasion #180	1	11,549	45,703	II
		2	10,895	44,108	
		3	13,283	43,184	
		4	10,643	43,956	
		5	10,317	44,619	
		\bar{X}	11,337	44,314	

		s	1,1778	0,9314	
		v	10,389	2,1018	
8	CBP (50%) – Al chimique – CBP (50%) chimique	1	12,505	44,441	II
		2	11,271	43,221	
		3	15,788	43,999	
		4	13,374	43,925	
		5	11,497	44,952	
		\bar{X}	12,887	44,108	
		s	1,8264	0,6433	
		v	14,172	1,4585	

*I : Le délaminage entre la couche de CBP et la couche d'aluminium.

*II : La rupture de composite sandwich au centre.

RÉFÉRENCES

- Amiotte, C. (2011). New Properties for Wood Products by the Use of Nanosol Technique and Development of a Wood Based Reinforced Composite. In. Lulea University of Technology, Mémoire de maîtrise, 90, Tiré de: <http://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A1028151&dswid=4900>, consulté le: 14/02/2019.
- ASTM, D. (2002). 638. *Standard test method for tensile properties of plastics, 3*, 1-16. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM, D. (2003). 790-03, 2003,“. *Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials,*” ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM, D. (2005). 1037-99 (2005) Standard test methods for evaluating properties of wood-based fiber and particle panel materials. *Annual Book of ASTM Standards*. ASTM, West Conshohocken, PA.
- AZOM. (2014). Identifying and Quantifying the Sugars Found in Maple Syrup using FTIR Spectroscopy. Tiré de: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=11414>, consulté le: 15/02/2019.

- Baillargeon, G. (2004). *Probabilités et statistique* (3^e ed.). Trois-Rivières, Canada. Chenelière Education. Baïlon, J.-P., & Dorlot, J.-M. (2000). *Des matériaux* (3^e ed.). Montréal, Canada. Presse de Polytechnique.
- Bengtsson, M., Le Baillif, M., & Oksman, K. (2007). Extrusion and mechanical properties of highly filled cellulose fibre–polypropylene composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 38(8), 1922-1931.
- Bres, L. (2017). *Interaction entre un plasma froid à la pression atmosphérique et des surfaces thermoplastiques industrielles: application à l'activation de surface*. Université Paul Sabatier-Toulouse III, Thèse de doctorat, 194, Tiré de : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01948418/>, consulté le: 20/12/2018.
- Bridier, J. (2016). L'assemblage composites thermoplastiques et métaux par collage structural. Tiré de: <https://docplayer.fr/58967840-L-assemblage-composites-thermoplastiques-et-metaux-par-collage-structural-jessy-bridier-adhesive-market-manager-sikaaxson.html>, consulté le 10/01/2019, consulté le: 07/01/2018.
- Bruneaux, M.-A. (2004). *Durability of adhesively bonded structures: development of a predictive mechanical modelling taking into account physico-chemical characteristics of the adhesive*. Ecole des Ponts ParisTech. Thèse de doctorat, 253. Tiré de: <https://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-00000821/>, consulté le: 26/01/2019.
- Dagenais, C. (2007). Aboutage de l'érable à sucre pour la fabrication de produits de bois d'ingénierie structuraux. Université de Laval, Mémoire de maîtrise, 131. Tiré de : <https://corpus.ulaval.ca/jspui/handle/20.500.11794/19665>, consulté le: 09/03/2019.

- Das, O., Sarmah, A. K., & Bhattacharyya, D. (2015). A sustainable and resilient approach through biochar addition in wood polymer composites. *Science of the Total Environment*, 512, 326-336.
- Ekeocha, R. J., & Ogbonnaya, S. K. (2018). Relevance of modeling and simulation in the management of engineering projects. *Journal of Mechanical Engineering Research*, 10(3), 21-27.
- Gacitúa, W., & Wolcott, M. (2009). Morphology of wood species affecting wood-thermoplastic interaction: Microstructure and mechanical adhesion. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 11(3), 217-231.
- Godin, M.-C. (2013). Valorisation de plastiques recyclés en provenance des centres de tri. Université de Laval, Mémoire de maîtrise, 109. Tiré de : <https://corpus.ulaval.ca/jspui/handle/20.500.11794/24747>, consulté le: 16/11/2018.
- Green, D. W., Winandy, J. E., & Kretschmann, D. E. (1999). Mechanical properties of wood. *Wood handbook: wood as an engineering material*. Madison, WI: USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, 1999. General technical report FPL; GTR-113: Pages 4.1-4.45, 113.
- Griffith, A. A. (1921). VI. The phenomena of rupture and flow in solids. *Philosophical transactions of the royal society of london. Series A, containing papers of a mathematical or physical character*, 221(582-593), 163-198.
- Hao, X., Zhou, H., Xie, Y., Mu, H., & Wang, Q. (2018). Sandwich-structured wood flour/HDPE composite panels: Reinforcement using a linear low-density polyethylene core layer. *Construction and Building Materials*, 164, 489-496.

- Harper, D. P., & Wolcott, M. P. (2006). Chemical Imaging of Wood–Polypropylene Composites. *Applied spectroscopy*, 60(8), 898-905.
- Hou, Y., Yan, S., Guo, X., & Di, M. (2017). Combined Surface Treatment of Polyethylene Wood-plastic Composites to Achieve Rapid Bonding with Desired Adhesion Properties. *BioResources*, 12(3), 6434-6445.
- ISO, B. (2012). 25178–2: Geometric Product Specification, Surface Texture (Areal). Part 2: Terms, Definitions and Surface Texture Parameters. British Standards Institute: London, UK.
- Jacob-Vaillancourt, C., & Galvez, R. (2017). Qualité des plastiques de la collecte sélective au centre de tri–Une approche systématique d'évaluation. *Vecteur Environnement*, 50(2), 54-65.
- Kawashita, L., Kinloch, A., Moore, D., & Williams, J. (2008). The influence of bond line thickness and peel arm thickness on adhesive fracture toughness of rubber toughened epoxy–aluminium alloy laminates. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 28(4-5), 199-210.
- Kenyence. (2019). Instrument de mesure de rugosité de surface. Tiré de : https://www.keyence.eu/fr/fr/ss/products/microscope/roughness/equipment/line_02.jsp. consulté le: 28/12/2017.
- Kraus, E., Baudrit, B., Heidemeyer, P., Bastian, M., Stoyanov, O., & Starostina, I. (2015). Problems in adhesion bonding of WPC. *Polymers Research Journal*, 9(3), 327.
- Mazerolle, M. (2016). AICcmodavg: model selection and multimodel inference based on (Q) AIC (c).–R package ver. 2.0-3. In: URL: <https://cran.r-project.org/package=AICcmodavg>, consulté le 06/03/2019.

- Migneault, S., Koubaa, A., & Perré, P. (2014). Effect of fiber origin, proportion, and chemical composition on the mechanical and physical properties of wood-plastic composites. *Journal of Wood Chemistry and Technology*, 34(4), 241-261.
- Mongkollapkit, N., Kositchaiyong, A., Rosarpitak, V., & Sombatsompop, N. (2010). Mechanical and morphological properties for sandwich composites of wood/PVC and glass fiber/PVC layers. *Journal of applied polymer science*, 116(6), 3427-3436.
- Oksman, K. (1996). Improved interaction between wood and synthetic polymers in wood/polymer composites. *Wood Science and Technology*, 30(3), 197-205.
- Oporto, G. S., Gardner, D. J., Bernhardt, G., & Neivandt, D. J. (2007). Characterizing the mechanism of improved adhesion of modified wood plastic composite (WPC) surfaces. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 21(11), 1097-1116.
- Québec, É. E. (2013). et RECYC-QUÉBEC (2014). *Caractérisation des matières résiduelles du secteur résidentiel 2012-2013—rapport synthèse*. Éco Entreprises Québec et RECYC-QUÉBEC. (Rapport n° 978-2-923955-06-3). Ville de Québec, Canada. Tiré de: <https://www.recyq-quebec.gouv.qc.ca/sites/default/files/documents/carac-2012-2013-rapport-synthese.pdf>, consulté le: 23/08/2018.
- Segovia Abanto, F. (2018). Développement d'un matériau composite à base de bois laminé avec alliage d'aluminium. Université de Laval. Thèse de doctorat, 174. Tiré de: <https://corpus.ulaval.ca/jspui/handle/20.500.11794/29810>, consulté le: 18/03/2019.

- Shebani, A., Van Reenen, A., & Meincken, M. (2009). The effect of wood species on the mechanical and thermal properties of wood—LLDPE composites. *Journal of Composite Materials*, 43(11), 1305-1318.
- Shi, H., Liu, F., Yang, L., & Han, E. (2008). Characterization of protective performance of epoxy reinforced with nanometer-sized TiO₂ and SiO₂. *Progress in Organic Coatings*, 62(4), 359-368.
- Specification, G. P. (2012). Surface texture: areal—Part 2: Terms, definitions and surface texture parameters. *International Standard ISO, 25178-25172*. British Standards Institution: London, UK.
- Thurston, R. M., Clay, J. D., & Schulte, M. D. (2007). Effect of atmospheric plasma treatment on polymer surface energy and adhesion. *Journal of Plastic Film & Sheeting*, 23(1), 63-78.
- Vermeeren, C. (2002). *Around Glare*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands.
- Wallenberger, F. T., & Weston, N. (2003). *Natural fibers, plastics and composites*. Pittsburgh, USA. Springer Science & Business Media.