

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département Génie mécanique

MÉMOIRE

Présenté pour l'obtention

LE DIPLOME DE MASTER

En : Génie mécanique

Spécialité : Génie des matériaux

Par

ABLAOUI Saadi

KEHILI Mohamed

BELMESSAOUD Abd Erraouf

ACHACHA Housseem Eddine

Sujet

Étude d'Élaboration et de Caractérisation Physicochimique et Mécanique du Matériau Composite Polymère/Bois

Soutenu publiquement, le / / ,

Devant le jury composé de :

Mr .CHIKH Noureddine	MC	Univ-BBA	Président
Mr. KHALDI Abdelghani	MC	Univ-BBA	Examineur
Mr. MEKHALFI Hamoudi	MC	Univ-BBA	Encadrant

Année Universitaire 2022/2023

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, nous remercions Dieu, qui nous a donné la force et la volonté de faire ce travail. Merci à Dieu de nous avoir éclairé le chemin de la réussite.

*Remerciements à tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué directement ou indirectement à la réalisation de ce modeste travail. En particulier **Dr. Mekhalfi Hamoudi** notre directeur de mémoire pour sa patience, et surtout ses conseils judicieux, qui ont contribué à alimenter notre réflexion.*

*Nous remercions notre Professeur **Raawach Al Hadj**, Chef du département de génie mécanique pour tous ses efforts pour nous, et Nous remercions aussi le docteur **Bouras.L.***

*Nous remercions gentiment **Dr Chikh N.** pour avoir accepté de présider notre jury d'évaluation. Nous remercions pareillement **Dr Khaldi A.** pour sa noble modeste geste c'est celui d'avoir accepté d'examiner notre mémoire.*

*Nous remercions aussi le chef du département de génie mécanique de l'Université de M'silla, **M. Rokbi***

Nous remercions beaucoup nos chers parents de leur appui et de leurs encouragements constants.

*Nous remercions aussi de nombreuses entreprises privées et publiques **MASTRE FOURAGE, CHIALI, PROSA TUBE, SHIK, CALE-PLAST et CI-PLAST** ainsi que le **CRTI** (centre de recherche en technologies industrielles) pour leur aide à nous dans ce projet et cette étude.*

Dédicace

Avant Tous Nous Remercions DIEU Le Tout Puissant Car Sans La Foi Qu'on A En Lui En Ne Serait Pas Arrivé Là Ou Est Aujourd'hui.

Avant Tous Nous Remercions DIEU Le Tout Puissant Car Sans La Foi Qu'on A En Lui En Ne Serait Pas Arrivé Là Ou Est Aujourd'hui.

*À Nos Très Chers Parents, Dont Le Sacrifice, La Tendresse, L'amour, La Patience, Le Soutien, L'aide Et Les Encouragements Sont L'essence De Nos Réussite. Sans Eux, Je Ne Serais Pas Ce Que **nous sommes** Aujourd'hui
A Nos Chères Frères et Nos chères sœurs*

Pour leur soutien moral et leurs conseils précieux tout au long de Nos études.

*Et A Toute Les Famille **Achacha, Ablaoui, Kahili et Belmessaoud***

A Tous Les Enseignants Et Les Profs Qui n'ont Appris Durant Toutes Mes Années D'étude Et Tous Ceux Qui N'ont Aidé De Près Ou De Loin.

A Nos Chère Amies :

Je Dédie Cet Humble Travail.

**HOUSSEM, SAADI,
ABD ERRAOUF, Mohamed**

Résumé

Le travail effectué dans ce mémoire de fin d'études nous a permis de cerner le contexte du projet entrepreneurial, déjà accompagné par l'incubateur des startups de l'université. D'emblée, l'étude s'est concentrée sur la viabilité réaliste de l'idée du projet, principalement dans son volet technique. Pour accomplir cette tâche, nous avons dû partir de zéro : d'abord, en rassemblant les matières premières, notamment les polymères PP et PEHD, ainsi que des déchets de bois et un agent de dispersion. Ensuite, nous avons exploré le milieu industriel ainsi que les unités de recherche de l'université BBA afin de mettre en œuvre les formulations du matériau composite, polymère/bois. La caractérisation physico-mécanique (traction, flexion, choc, absorption, poids apparent) a été réalisée sur des éprouvettes normalisées moulées par compression. À cet effet, nous avons fabriqué nous-mêmes un moule porte-échantillon. Les conditions de transformation des matériaux ont été recherchées puis optimisées (température, pression, volume de matière, formulation, granulométrie). Nous avons élaboré un prototype du produit fini, c'est-à-dire un panneau composite, dans un moule approprié. Les résultats obtenus et relatifs à chaque propriété étudiée sont convenablement discutés et répondent aux exigences d'application du matériau.

Mots clés : Matériau composite polymère/bois, déchet de bois, caractéristiques physico-mécaniques, moulage par compression.

Abstract

The work carried out in this dissertation has enabled us to identify the context, of the entrepreneurial project, already supported by the university's start-up incubator. From the outset, the study was oriented towards the realism of the idea of the project, mainly in its technical aspect. In order to accomplish this task, we were forced to make a clean sweep: first, supply the raw materials, in particular: PP and HDPE polymers plus wood waste plus dispersing agent. Secondly, explore the industrial environment as well as the research units on the borders of the MBI University in order to implement the formulations of the composite material, polymer/wood. The physico-mechanical characterization (Tensile, bending, impact, absorption, and apparent weight) was carried out on standardized specimens molded by compression. For this purpose, we manufacture a sample holder mold. Material processing conditions were researched and then optimized (T° , pressure, material volume, formulation, particle size). A prototype of the finished product, or composite panel, has been developed in a suitable mold. The results obtained and relating to each property studied are suitably discussed and meet the application requirements of the material.

Keywords: Polymer/wood composite material, wood waste, physico-mechanical characteristics, compression molding.

ملخص

سمح لنا العمل الذي تم تنفيذه، في هذه الأطروحة النهائية، بفهم سياق مشروع ريادة الأعمال، المصحوب بالفعل بحاضنة بدء تشغيل الجامعة. ومنذ البداية، وجهت الدراسة نحو واقعية فكرة المشروع، ولا سيما في جانبها التقني. من أجل إنجاز هذه المهمة، اضطررنا إلى عمل صفحة نظيفة: أولاً، توفير المواد الخام، على وجه الخصوص: البوليمرات PP و PEHD بالإضافة إلى نفايات الخشب بالإضافة إلى عامل المعالجة ثانياً، استكشاف البيئة الصناعية وكذلك وحدات البحث بجامعة برج بوعريريج على الحدود لتنفيذ تركيبات مادة البوليمر/الخشب المركبة. تم إجراء التوصيف الفيزيائي الميكانيكي (الشد، الانحناء، التأثير، الامتصاص، الوزن الظاهر) على قطع الاختبار القياسية المصنوعة بالضغط. لهذا الغرض، يتم تصنيع عينة قالب من قبلنا. تم البحث عن ظروف معالجة المواد ثم تحسينها (T° ، الضغط، حجم المادة، التركيب، حجم الجسيمات). تم تطوير نموذج أولي للمنتج النهائي، أو اللوحة المركبة، في قالب مناسب. تتم مناقشة النتائج التي تم الحصول عليها وبالنسبة لكل ممتلكات تمت دراستها بشكل صحيح وتفي بمتطلبات تطبيق المواد.

الكلمات المفتاحية: مادة مركبة بوليمر/خشب، نفايات خشبية، خصائص فيزيائية ميكانيكية، قوالب ضغط.

LISTE DES ABRÉVIATIONS

ASTM American Society for Testing and Materials

CBP Composite bois-polymère

CNC Computer Numerically Controlled

MEB Microscope électronique à balayage

MO Macroscopique optique

PB Poudre de bois

PEHD Polyéthylène haut densité

PP Polypropylène

LISTE DES SYMBOLES

rpm Rotation par min

ET Allongement à la rupture

E Module élasticité E ou module de Young

σ_R Contrainte à la rupture

ε Déformation

Rm Résistance à la traction

Fm Force maximale

F Force mesurée à la limite proportionnelle

Fp Force mesurée à la limite proportionnelle

δ Déflexion

aw Résistance au choc d'éprouvettes lisses

Ec Énergie absorbée

a Résistance au choc d'éprouvettes lisses

Cw,s Coefficient d'absorption d'eau par capillarité

mso,s Masse de l'éprouvette après immersion pendant un temps

mdry,s Masse de l'éprouvette après séchage

As Surface brute de la face de l'éprouvette immergée dans l'eau

Tso Temps d'immersion

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : Vis d'extrusion	5
Figure 1.2 : Schéma d'une extrudeuse mono-vis [5].....	5
Figure 1.3 : Unité d'injection.....	6
Figure 1.4 : Représentation schématique des différentes couches de la paroi cellulaire. [13]	9
Figure 1.5 : La structure de la cellulose [16].....	10
Figure 1.6 : Structure chimique de l'hémicellulose [18].....	10
Figure 1.7 : Structure de la lignine [21].	11
Figure 1.8 : Lien mono-ester (a) et di-ester (b) formé par le PEMA et les groupements hydroxyles du bois ou de la cellulose [28]	13
Figure 1.9 : Phénomène d'adsorption [31].....	14
Figure 2.1 : Plan de préparation des échantillons	21
Figure 2.2 : Photo présente le bois d'arbre de saule	22
Figure 2.3 : Plan de traitement de charge en poudre de bois.....	23
Figure 2.4 : Déchet de bois de saule blanc	26
Figure 2.5 : poudre de bois utilisé (1) granulométrie de 400µm et (2) granulométrie de 500µm.....	27
Figure 2.6 : La procédure pour fabrication du Matrice polymère /poudre de bois.....	30
Figure 2.7 : extrudeuse mono-vis (modèle TEDERIC).....	31
Figure 2.8 : mélangeur à deux cylindres (RODOLFO COMERIO-ITALIA)	32
Figure 2.9 : les granules bois-polymère (1) PB + PP et (2) PB + PEHD	32
Figure 2.10 : moule ASTM d'essais physiques et mécaniques utilisant pour préparés des éprouvettes	33
Figure 2.11 : les granules de CBP dans moule norme ASTM	34
Figure 2.12 : machine manuelle de presse thermo hydraulique.....	34
Figure 2.13. : Éprouvettes d'essais normalisées : 1 (PB +PP) et 2 (PB +PEHD). A) pour le test de traction ;	35
Figure 2.14 : Machine d'essai universelle JINGMI WDR-W de capacité 20 kN	37
Figure 2.15 : Machine d'essais traction et flexion d'universelle Zwick/Roell ZD60 de capacité 5 kn	38
Figure 2.16 : Machine Mouton pendule, modèle CEAST 9050 utilisée pour l'essai d'impact	40
Figure 2.17 : Absorption d'eau par capillarité	41
Figure 2.18: macroscopique optique (OPTIKA)	42
Figure 2.19 : Microscope électronique à balayage (MEB).....	43
Figure 3.1 : Comparaison de la contrainte de traction CBP de différents taux de PB et de la granulométrie entre PEHD et PP.....	45
Figure 3.2 : Comparaison de la déformation de traction CBP de différents taux de PB et de la granulométrie entre PEHD et PP.....	46
Figure 3.3 : Comparaison de module d'élasticité de traction CBP de différents taux de PB et de la granulométrie entre PEHD et PP.....	47
Figure 3.4 : courbe d'essai de flexion de CPB en fonction du taux de charge et de la granulométrie.....	47

Figure 3.5 : Comparaison de la contrainte de flexion CBP de différents taux de PB et de la granulométrie entre PEHD et PP	49
Figure 3.6 : Comparaison de la déformation de flexion CBP de différents taux de PB et de la granulométrie entre PEHD et PP	49
Figure 3.7 : Comparaison de module d'élasticité de flexion CBP de différents taux de PB et de la granulométrie entre PEHD et PP	50
Figure 3.8 : courbe d'essai de flexion du CPB en fonction du taux de charge et de la granulométrie	50
Figure 3.9 : Comparaison la résistance au choc de CBP de différents taux de fibres et de la granulométrie entre PEHD et PP	52
Figure 3.10 : l'Absorption d'eau de matrice PP/PB de différents taux de PB et de la granulométrie	54
Figure 3.11 : l'Absorption d'eau de matrice PEHD/PB de différents taux de PB et de la granulométrie ...	54
Figure 3.12 : Image macroscopique de la poudre de bois (MO) à moyen grossissement	55
Figure 3.13 : Image de microscopie électronique à balayage (MEB) du (PEHD 40% poudre de bois 400 μm) en traction	56
Figure 3.14 : Image de microscopie électronique à balayage (MEB) du (PEHD 40% poudre de bois 500 μm) en traction	56
Figure 3.15 : Image de microscopie électronique à balayage (MEB) du (PP 40% poudre de bois 400 μm) en traction.....	57
Figure 3.16 : Image de microscopie électronique à balayage (MEB) du (PP 40% poudre de bois 500 μm) en traction.....	57
Figure 3.17 : Image de microscopie électronique à balayage (MEB) du (PEHD40% poudre de bois 400 μm) en Choc Charpy	58
Figure 3.18 : Image de microscopie électronique à balayage (MEB) du (PEHD 40% poudre de bois 500 μm) en Choc Charpy,.....	58
Figure 3.19 : Image de microscopie électronique à balayage (MEB) du PB avec traitement.....	59

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 01 : fiche technique de polypropylène (PP)	23
Tableau 02 : fiche technique de polyéthylène haute densité (PEHD).....	24
Tableau 03 : effet de traitement thermique.....	26
Tableau 04 : type de mélange (PB + PP)	29
Tableau 05 : type de mélange (PB + PEHD).....	29
Tableau 06 : les normes et les dimensions d'essais physiques et mécaniques réalisés sur CBP	33
Tableau 07 : résultats de traction CBP de différents taux de PB de la granulométrie 400µm entre PP et PEHD	44
Tableau 08 : résultats de traction CBP de différents taux de PB de la granulométrie 500µm entre PP et PEHD	44
Tableau 09 : résultats de flexion CBP de différents taux de PB de la granulométrie 400µm entre PP et PEHD	48
Tableau 10 : résultats de flexion CBP de différents taux de PB de la granulométrie 500µm entre PP et PEHD	48
Tableau 11 : résultats de choc CBP de différents taux de PB de la granulométrie 400µm entre PP et PEHD	51
Tableau 12 : résultats de choc CBP de différents taux de PB de la granulométrie 500µm entre PP et PEHD	51

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS

DÉDICACE

RÉSUMÉ

LISTE DES ABRÉVIATIONS

LISTE DES SYMBOLES

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

INTRODUCTION GÉNÉRALE	1.2
1.1. Composites en polymère/bois(CBP)	3
1.1.1. Domaines d'utilisation	3
1.1.2. Les techniques de fabrication des CBP.....	4
1.1.2.1 extrusions	4
1.1.2.2 Injection	5
1. 2. Matières premières	7
1.2.1. Matrice polymère	7
1.2.1.1. Les thermoplastiques	7
1.2.1.2 .Les polyéthylènes	8
1.2.1.3. Les polypropylènes	8
1.2.2. Les fibres de bois.....	9
1.2.2.1. Cellulose	9
1.2.2.2 Hémicellulose.....	10
1.2.2.3. Lignines.....	11
1.2.3. Méthodes de modification chimique	11
1.2.3.1. Les agents de dispersion	11
1.2.4. Agents de couplage	12
1.2.5. Phénomène d'adsorption.....	13
1.2.5.1. Adsorption physique ou physisorption.	13
1.2.5.2. Adsorption chimique ou chimie sorption	14
1.3. Traitement chimique des fibres végétales.....	15
1.4. Traitement thermique des fibres de bois.....	15
1.4.1. Le séchage.....	16
1.4.2. Le séchage haut température.....	16
1.4.3. Effet du traitement thermique des fibres de bois sur les propriétés physicomécaniques des composites bois-polymère	17

1.4.4. Effet du traitement thermique sur l'hygroscopicité et la chimie de surface des CBP	18
1.5. Recyclage des déchets plastiques.....	19
1.5.1. Définition de recyclage)	19
1.5.2 Statistiques sur le recyclage	19
1.6. Le recyclage du bois.....	20
2. Appareillages et conditions expérimentales	21
2.1. Objectif de travail	21
2.2. Les procédures de préparation des échantillons	21
2.3.1. Poudre de bois des arbres de saule ou peuplier	22
2.3.2. La matrice polymérique	22
2.3.2.1. Le polypropylène (PP)	22
2.3.2.2. Le polyéthylène haute densité (PEHD)	23
2.3.2.3. Fiche technique des matrices utilisées	23
2.3.3 Méthodes de préparation de CBP	25
2.3.3.1. Préparation de poudre de saule.....	25
2.3.3.2. Traitement thermique	26
2.3.3.3. Traitement mécanique	27
2.3.3.4. Traitement chimique (Traitement surface)	27
2.3.3.5. Effet de Traitement de surface	28
2.3.3.6. La densité apparente de bois de saule	28
2.4. Les types de mélange	28
2.5. Méthodes de préparation des mélanges CBP.....	30
2.5.1. Les procédures pour la fabrication de la Matrice polymère.....	30
2.5.1.1. Préparation des mélanges PB/PP par l'extrusion	31
2.5.1.2. Préparation des mélanges PB/PEHD par calandrage ou laminage dans un Mélangeur à deux cylindres	31
2.5.1.3 Préparation de moule sur la norme ASTM	32
2.5.1.4. Etape de remplissage du moule avant compression	34
2.6. Caractérisation des composites bois-polymère	35
2.6.1. Caractérisation des propriétés mécaniques	35
2.6.1.1. Essais de traction	35
2.6.1.2. L'essai de flexion.....	37
2.6.1.3. Test d'impact choc	38
2.6.2. Caractérisation des propriétés physiques	40
2.6.2.1. Absorption d'eau.....	40
2.6.2.2. Caractérisation microscopique de la poudre de bois (MO) à moyen grossissement	41
2.6.2.3. Caractérisation macroscopique du composite par (MEB)	42
3. Résultats et Discussion.....	44
3.1. Essai de traction	44

3.2. Essai de flexion	48
3.3. Test d'impact choc	51
4. Absorption d'eau	53
3.4. Caractérisation des propriétés de la surface	55
1. Caractérisation microscopique de la poudre de bois (MO) à moyen grandissement	55
3.5. Caractérisation macroscopique, du composite par (MEB)	55
CONCLUSION	60
LES RECOMMANDATIONS	61
RÉFÉRENCES	

INTRODUCTION GÉNÉRALE

INTRODUCTION GÉNÉRALE

L'utilisation des déchets de bois, qu'ils proviennent de l'industrie ou de l'artisanat, en tant que charge pour la matrice plastique, est devenue une tendance remarquable en faveur de la protection de l'environnement. Cette approche vise principalement le marché de la construction, en particulier pour l'habillage intérieur et extérieur des bâtiments. Les panneaux en matériau composite plastique-charge de bois offrent des avantages techniques, économiques et écologiques très convaincants par rapport aux matériaux conventionnels à base de déchets de bois divers, tels que les agglomérés.

Dans le secteur du bâtiment, le bois filaire est apprécié pour ses propriétés isolantes phoniques et thermiques. Le matériau composite en plastique associé à la poudre de bois filaire offre une alternative de substitution à d'autres pièces traditionnelles telles que les habillages muraux et les planchers.

Ces matériaux composites (plastique poudre de bois) doivent répondre aux exigences du cahier des charges, telles que la rigidité ou la résilience, la diversité de mise en forme des panneaux, la possibilité de modifier leur surface, ainsi que leur recyclabilité après utilisation.

L'idée de cette étude prend forme en un projet innovant, accompagné par le ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche scientifique en collaboration avec le ministère de l'Économie de la Connaissance et des micro-entreprises.

Les intrants utilisés dans la fabrication des matériaux composites (plastique/poudre de bois) sont les suivants :

- Le polypropylène PP et le polyéthylène haute densité PEHD, utilisés comme matrice principale du matériau ;
- La poudre de bois utilisée comme charge de renforcement du matériau.

La matrice a été choisie pour répondre aux exigences techniques, le PP pour sa rigidité, le PEHD pour sa résilience, sa tenue au pliage et son imperméabilité à l'eau.

L'agent de dispersion, l'acide stéarique AS, permet une grande dispersion et homogénéité de la poudre de bois filaire.

La poudre de bois et un polymère à base lignocellulosique, compatible avec la matrice polymère.

Ces intrants ont fait l'objet d'une caractérisation préliminaire.

Les matériaux composites sont mis en œuvre par extrusion et laminage dans différentes usines fabriquant des polymères.

Les spécimens destinés aux tests physico-chimiques et mécaniques sont préparés par moulage compression statique.

Le moule des spécimens est fabriqué par nos soins selon la norme ASTM.

La rédaction de ce mémoire comprend 3 chapitres, avec une partie théorique suivie d'une partie matérielle et méthodologique, et se termine par une partie présentation des résultats et discussions.

CHAPITRE 01
PARTIE THÉORIQUE

1.1. Composites en polymère/bois(CBP)

Les CBP sont des nouveaux matériaux d'origine biologique BIO-SOURCE, dotés de propriétés spécifiques. Actuellement, les différents produits CBP disponibles sur le marché sont basés sur des résines thermodurcissables renforcées par des fibres de verre, de carbone et des fibres végétales. Un produit composite comprend trois éléments principaux. Le premier élément est appelé polymère, le second est la charge ou l'agent de renforcement ou de remplissage, en fonction des objectifs de production du CBP. En général, les charges pour les CBP sont des matériaux lignocellulosiques tels que les fibres de bois, les fibres de papier (dont les fibres kraft), les particules de cellulose, le biochar, etc. Le deuxième élément est la matrice composite. Pour les CBP, le thermoplastique est généralement utilisé comme matrice. Comme troisième élément, une petite quantité de résine thermoplastique chargée est mélangée avec un agent de couplage pour obtenir des CBP moulés par extrusion, consolidation thermique ou moulage par injection. [1]

1.1.1. Domaines d'utilisation

L'utilisation des CBP a considérablement augmenté ces dernières années. Les CBP remplacent progressivement plusieurs autres matériaux tels que le bois naturel, les plastiques et les composites à base de fibres de verre. Cette concurrence s'observe dans diverses applications, qu'elles soient intérieures (cadres de porte ou planchers) ou extérieures (meubles de jardin ou terrasses). Une étude réalisée par le Centre de recherche industrielle du Québec en 2013 (CRIQ 2013) indique que le marché mondial des CBP a été estimé à 2,4 millions de tonnes en 2011 et devrait doubler d'ici 2016. Cette étude fait partie d'une stratégie de revitalisation de la filière de la forêt feuillue québécoise envisagée par le ministère des Ressources naturelles (MRN). Le CBP a été identifié parmi 10 produits nécessitant une consommation annuelle de 100 000 à 250 000 m³ de bois. Il est également remarquable que les CBP suscitent un intérêt croissant chez les industriels et commencent à être utilisés dans des domaines complexes et importants tels que l'ingénierie de pointe. Les progrès réalisés en termes de propriétés (durabilité et propriétés mécaniques) expliquent cette augmentation de leur utilisation. On peut diviser le domaine d'utilisation des CBP en quatre groupes :

- Les matériaux de construction

- Les matériaux de transport

- Le matériel militaire
- Les composants de meubles [2]

1.1.2. Les techniques de fabrication des CBP

Divers procédés ont été utilisés pour fabriquer les CBP, tels que l'extrusion, l'injection, l'imprégnation, le thermoformage, le calandrage, la pultrusion, le roto moulage et le moulage par compression. [3][4]

1.1.2.1 Extrusion

L'extrusion est le processus de fabrication et de transformation de matériaux granulaires ou granuleux façonnés dans un profil [5]. Les fibres sont incorporées dans le thermoplastique lors de l'extrusion grâce à un système de vis (double ou simple). Le processus d'extrusion comprend trois zones principales :

1. Zone d'alimentation : Dans cette zone, le matériau est sous forme de poudre ou de granulés et se comporte comme un agglomérat hétérogène avec une densité qui varie.
2. Zone de compression : Sous l'action conjuguée de la pression exercée par la vis, des températures de rotation, du barillet et de la vis, ainsi que de la contre-pression de la filière, le matériau se gélifie progressivement. La vitesse de gélification dépend de la viscosité thermique du matériau, de la température, de la vitesse et de la géométrie de la vis.
3. Zone de transfert ou de pompage : Le matériau entièrement gélifié est poussé vers la tête, la filière et éventuellement d'autres composants tels que des filtres et des moules. Le filtre est conçu pour ralentir le flux de matière, amortir sa rotation et retenir la masse de matière en gélification insuffisante.

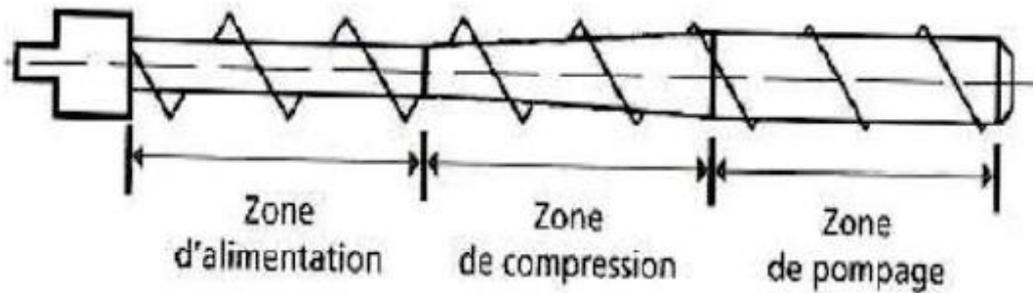


Figure 1.1 : Vis d'extrusion

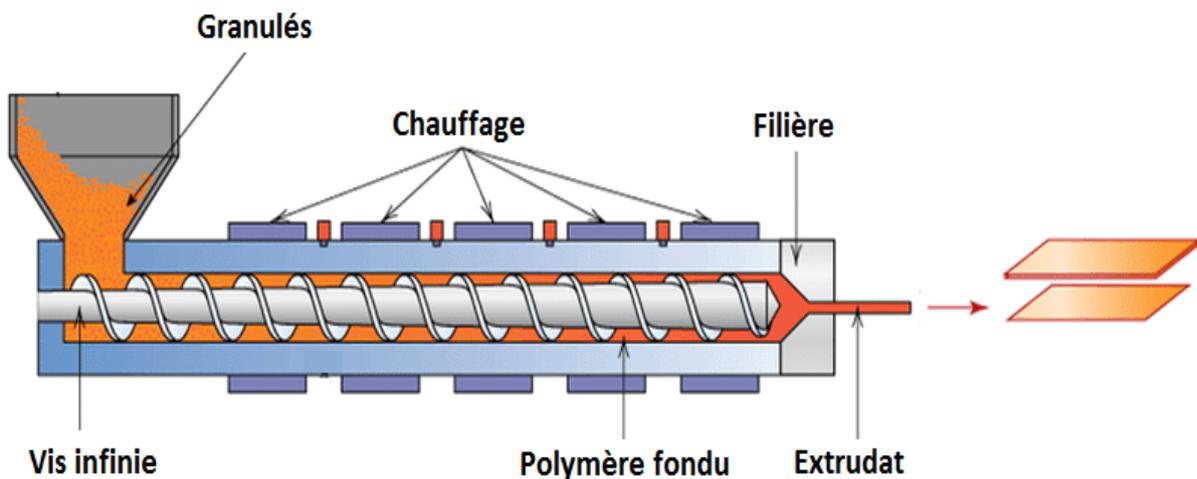


Figure 1.2 : Schéma d'une extrudeuse mono-vis [5]

1.1.2.2 Injection

L'injection est un processus semi-continu dans lequel le matériau polymère fondu est d'abord injecté dans un moule trempé et maintenu sous pression. Une fois qu'il est en cours de durcissement, on le retire. Comme avec une extrudeuse, la résine est chargée dans une trémie, puis plastifiée par vis d'accumulation. Contrairement à l'extrusion, la vis d'une presse est en action pendant la plastification. Le polymère homogénéisé fondu s'accumule à l'extrémité avant de la vis dans la zone d'accumulation. Lorsque la quantité prédéterminée de polymère a été plastifiée, la vis agit comme un piston et injecte la résine dans le moule trempé sous haute pression. Par conséquent, une machine de moulage par injection peut être considérée comme un hybride entre une extrudeuse et une machine de moulage par injection, ou une presse à compression.

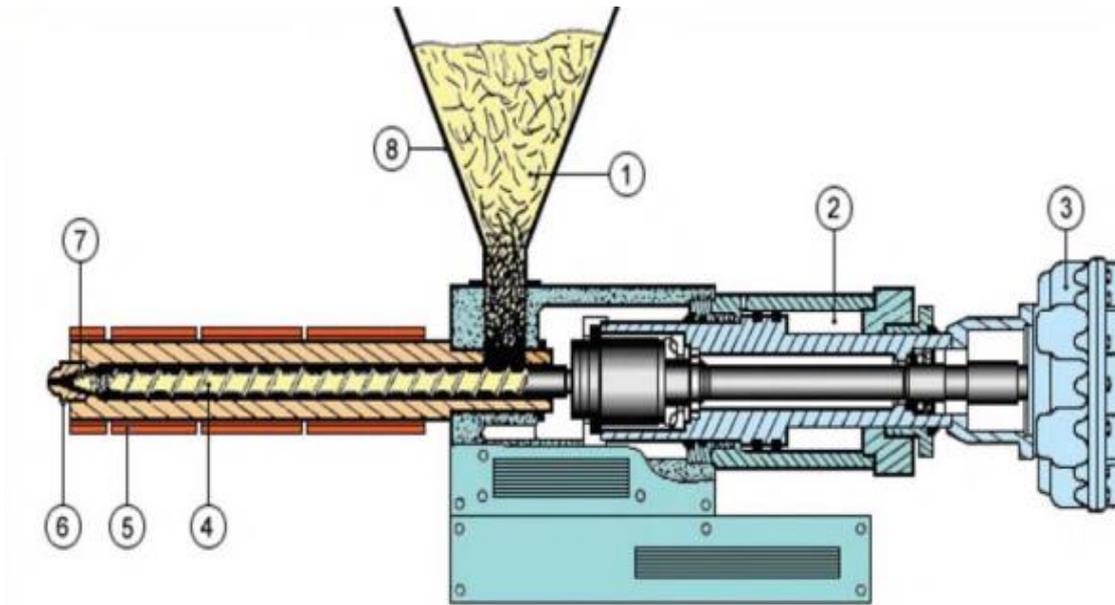


Figure I.3 : Unité d'injection. [8]

- | | |
|-----------------------------|-----------------------|
| 1-Granulés. | 5- Foureau chauffant. |
| 2-Vérin d'injection. | 6- Buse d'injection. |
| 3-Moteur de d'alimentation. | 7- Clapet. |
| 4-Vis sans fin. | 8- Trémie. |

Le cycle de fonctionnement de la machine de moulage par injection peut être divisé en 6 étapes (Silva, 2011) :

1) La plastification commence- la vis tourne et prélève du matériau dans la trémie de la machine de plastification en même temps. Le matériau est fondu sous l'action du cisaillement interne, des frottements et des réchauffeurs externes, puis il est acheminé dans la chambre à vis opposée à la pointe de la vis. L'action de compression de la vis provoque une surpression devant la pointe de la vis ; cette surpression permet de remplir la cavité du moule avec une quantité de matière fondue suffisante.

2) Fin de plastification - lorsque le matériau atteint une certaine quantité, la vis cesse de tourner car la cavité de la vis est pleine de matériau fondu.

3) Serrage - L'unité de serrage avec la plaque d'empreinte avance pour fermer le moule.

4) Début de l'injection - la pression dans le cylindre augmente et l'hydraulique fait avancer la vis sans rotation pour pousser le matériau fondu de la cavité vers la cavité du moule.

5) Fin du refroidissement par injection - lorsque la cavité du moule est complètement remplie avec le matériau fondu, ce dernier refroidit dans le moule. Comme le moule est froid, la vis applique une pression supplémentaire pour compenser le retrait du matériau. L'unité d'injection est alors redémarrée pour préparer le matériau pour la prochaine injection.

6) Démoulage du produit - lorsque la partie du moule refroidit et devient suffisamment solide, le moule s'ouvre et l'article est éjecté par l'éjecteur. [7]

1. 2. Matières premières

1.2.1. Matrice polymère

Polymères, métaux et céramiques en tant que substrats : composites performants sur demande. Fibres liées à la matrice pour protéger les éléments structurels, transmettre et répartir les charges agissant sur elles. Les polymères sont le plus souvent utilisés comme matrices en raison de leur ductilité. Faciles à traiter, à haute densité et durables, ils se répartissent en trois catégories : thermoplastiques et élastomères thermodurcissables.

1.2.1.1. Les thermoplastiques

La température ambiante, ces matériaux sont solides, avec des caractéristiques structurelles telles qu'une taille moléculaire limitée et une structure linéaire ou ramifiée. Ils présentent de très bonnes propriétés mécaniques, comme la ductilité. Sous l'action de la chaleur, ils deviennent flexibles jusqu'à ce qu'ils fondent : l'énergie thermique suffit à rompre les liaisons entre les molécules, ce qui leur permet de glisser les unes sur les autres. D'autre part, l'avantage est qu'à l'état fondu, vous pouvez les mouler dans la forme que vous souhaitez. Ces procédés industriels permettent la fabrication individuelle et discrète d'objets qui peuvent être déformés car ils sont malléables sous l'action de la chaleur et conservent cette forme après refroidissement. Ce phénomène permet d'en développer d'autres. La technologie utilisée dans leur moulage est réversible, permettant le recyclage : les objets sont broyés et fondus. Les principaux thermoplastiques sont le polyéthylène PE, le polypropylène PP, le polystyrène PS, le chlorure de polyvinyle PVC, et le polyamide PA.”, [8]

1.2.1.2 .Les polyéthylènes

Les polyéthylènes sont en effet les polymères les plus couramment utilisés dans les industries du monde entier, représentant plus de 90% du tonnage produit. Ces polymères sont formés par la polymérisation des molécules d'éthane [-CH₂CH₂-].

En général, les propriétés du polyéthylène varient en fonction de sa densité. Plus la densité augmente, plus la rigidité, le retrait, la résistance chimique et la dureté augmentent. La température de fusion du polyéthylène varie généralement entre 106°C et 130°C, selon sa densité.

Le polyéthylène, ainsi que le polypropylène (PP), présentent une absorption presque nulle des ondes électromagnétiques et une grande résistance chimique. De plus, le polyéthylène montre une grande résistance à l'oxydation par rapport aux autres polyoléfines, y compris le polypropène (PP).

Le polyéthylène à haute densité (PEHD) présente une cristallinité accrue par rapport au polypropylène, ce qui conduit à une augmentation de la résistance, de la densité, du retrait, de la résistance au fluage, de la résistance à l'usure et de la dureté. [9]

1.2.1.3. Les polypropylènes

Comparativement au polyéthylène, le polypropylène (PP) est plus léger, plus fort et plus rigide. Il présente une meilleure résistance au fluage et une usure moindre, mais il est également résistant aux rayons ultraviolets. Sa formule chimique est [-CH₂- CH(CH₃)-] [10]. Les polypropylènes sont subdivisés en homopolymères et copolymères. Les homopolymères sont plus cristallins, ont une température de fusion bien définie à 161-165°C et ont une distribution de poids moléculaire assez étroite. Les copolymères contiennent généralement une certaine quantité d'éthylène et sont à leur tour subdivisés en copolymères aléatoires et en copolymères en blocs. Leur point de fusion varie de 140 à 155°C [9]. L'utilisation de ce polymère est en croissance et il reste parmi les choix les plus importants de matières premières dans les industries.[11].

1.2.2. Les fibres de bois

Le bois est parmi les matériaux de construction les plus faciles à transformer. Cependant, le bois est un matériau très variable et sa composition chimique est assez complexe. En effet, ces propriétés varient d'un bois feuillu à un bois résineux, d'un bois juvénile à un bois mature, d'un bois initial à un bois final et entre le bois d'aubier et de duramen

Les fibres de bois sont constituées principalement de trois polymères organiques. La cellulose, les hémicelluloses et la lignine. Ils sont disposés d'une façon précise dans la paroi de la fibre. La figure 1. 4 illustre la composition de la paroi cellulaire [12]

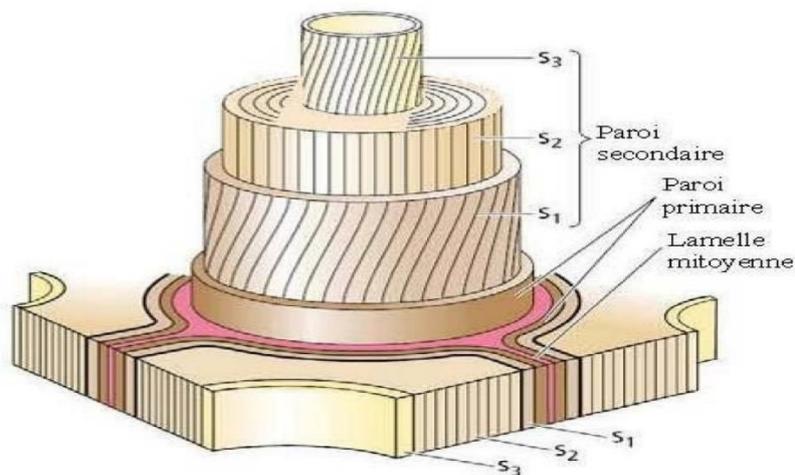


Figure 1.4 : Représentation schématique des différentes couches de la paroi cellulaire. [13]

1.2.2.1. Cellulose

La cellulose est le constituant majoritaire et essentiel des fibres végétales. C'est un polymère linéaire constitué d'enchaînements de cycles glucopyranose avec une liaison glycosidique de type β 1-4. Le degré de polymérisation varie selon l'origine des fibres et le procédé d'isolement ; il est supérieur à 3000 pour le coton et égal à 1500 pour les pâtes de bois obtenues avec un minimum de dégradation [14],[15]."

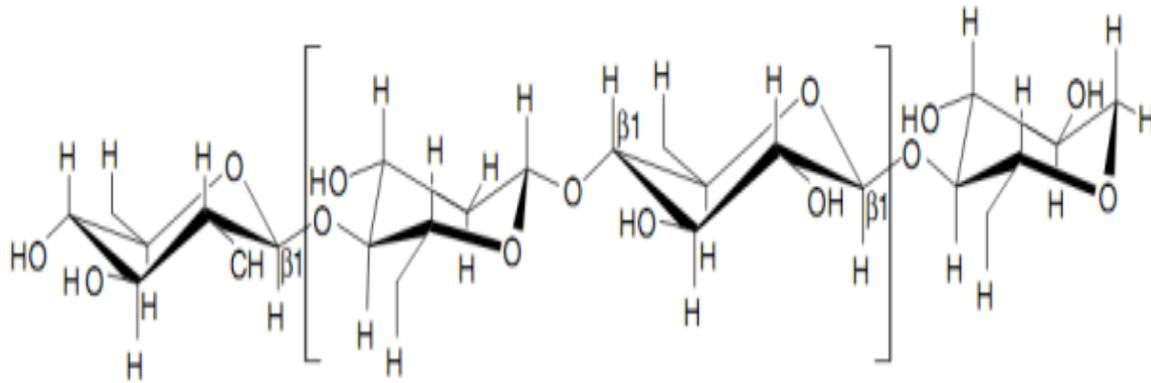


Figure 1.5 : La structure de la cellulose [16].

1.2.2.2 Hémicellulose

L'hémicellulose n'est pas une forme de cellulose. Elle comprend un groupe de polysaccharides composés d'une combinaison de cycles à 5 et 6 carbones. L'hémicellulose forme la matrice de support des microfibrilles de cellulose. L'hémicellulose diffère de la cellulose sur trois aspects. Tout d'abord, elle est composée de sucres neutres tels que le xylose, l'arabinose, la galactose, le glucose, le mannose, et d'acides uroniques, alors que la cellulose ne contient que des unités 1,4- β D-glucopyranose. Deuxièmement, elle présente un degré considérable de ramifications contenant des groupes latéraux, à l'origine de sa nature non-cristalline. Enfin, à l'état naturel, elle a un degré de polymérisation compris entre 50 et 300, tandis que celui de la cellulose native est 10 à 100 fois plus élevé. L'hémicellulose est très hydrophile, soluble en milieu alcalin et facilement hydrolysable dans les acides [17]."

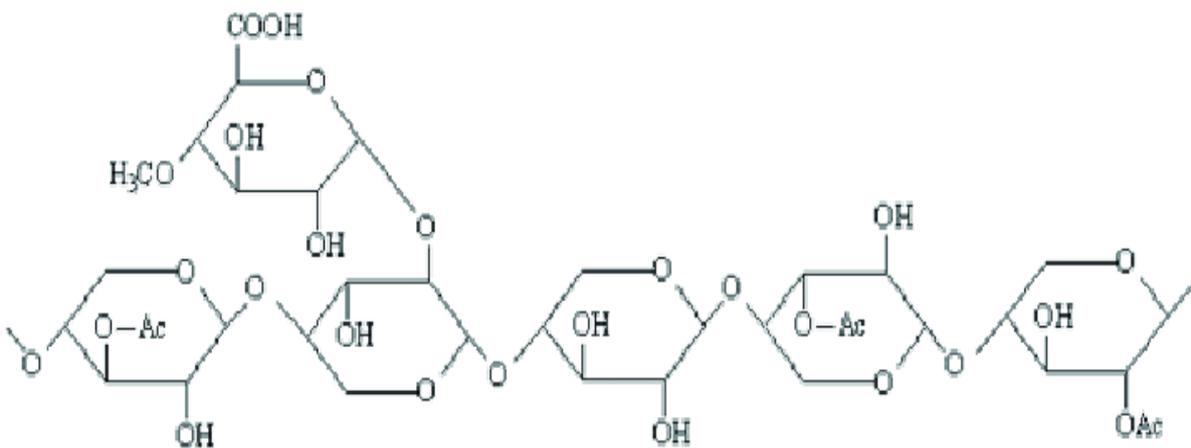


Figure 1.6 : Structure chimique de l'hémicellulose [18]

1.2.2.3. Lignines

La lignine est, après la cellulose, la matière organique renouvelable la plus abondante. Elle est constituée de polymères phénoliques tridimensionnels et ne possède pas de motifs répétitifs. La structure complexe de la lignine, comprenant de nombreuses fonctions phénoliques, hydroxyles et éthers, explique sa grande réactivité. Cependant, leur accessibilité est limitée par la conformation tridimensionnelle du réseau moléculaire [19],[20].

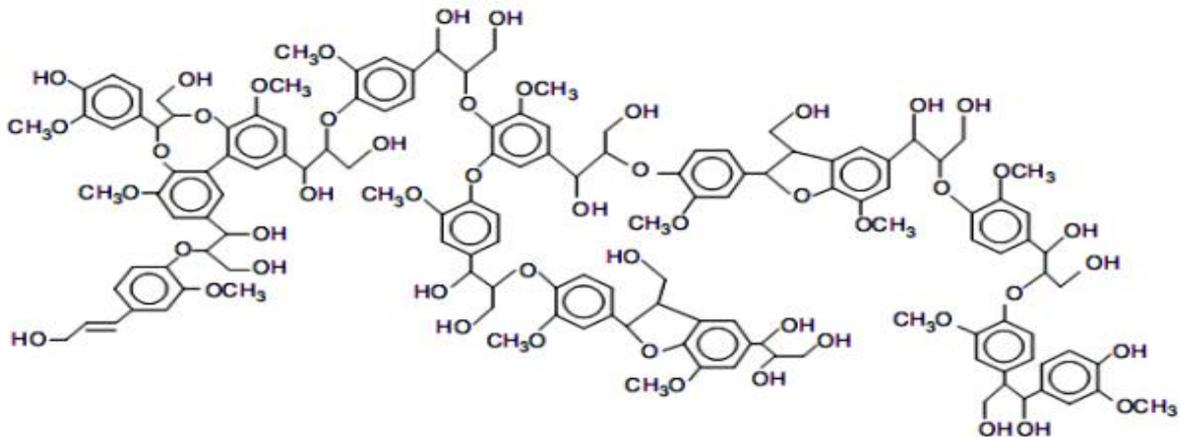


Figure 1.7 : Structure de la lignine [21].

1.2.3. Méthode de modification chimique

La modification chimique du bois a été largement utilisée dans la fabrication des composites bois-polymère. L'objectif est de rendre les fibres en bois, qui sont naturellement polaires, plus compatibles avec les polymères thermoplastiques qui sont non-polaires. Pour cela, un traitement chimique des fibres végétales est effectué pour éliminer certains composés tels que l'hémicellulose, la lignine, la pectine et d'autres impuretés présentes à la surface des fibres. Cela permet de réduire leur caractère hydrophile et d'améliorer l'adhésion interfaciale entre les fibres et la matrice polymère. Plusieurs techniques chimiques pour le traitement des fibres naturelles sont rapportées dans la littérature, notamment [22].

1.2.3.1. Les agents de dispersion

Ces produits agissent afin de faciliter l'ajout d'agents de traitement de surface dans la fabrication des composites polymère/bois. Parmi ces agents de traitement de surface, on trouve les agents dispersifs, les formules d'acides gras, les cires et les paraffines, qui permettent une mise en œuvre aisée du matériau composite.

Les agents de dispersion assurent une meilleure homogénéité du mélange polymère/bois et réduisent les contraintes mécaniques lors des processus de transformation par extrusion, injection et compression à l'état fondu. D'autres additifs tels que les élastomères et les plastifiants sont également utilisés comme agents de mouillage et de fluidification.

En outre, il existe d'autres techniques de traitement physique qui peuvent modifier considérablement les propriétés de surface du composite, telles que l'irradiation par ultraviolet, la corona-décharge, la mercerisations et le traitement à l'ozone.

Toutes ces méthodes offrent une gamme de solutions plus ou moins faciles à mettre en œuvre. Parmi elles, les agents dispersifs et les additifs sont les plus largement répandus dans le domaine des composites bois-polymère en raison de leur facilité d'application [23]. Certains agents de dispersion couramment utilisés dans l'industrie sont l'acide stéarique, le dodecylbenzène sulfoné (DDBS), la cire WAX, etc.

1.2.4. Agents de couplage

Les performances mécaniques des composites à matrice thermoplastique renforcés de fibres de bois dépendent de la qualité de l'adhésion entre la matrice polymérique et les renforts organiques. Étant donné que la matrice thermoplastique est hydrophobe tandis que les fibres de bois sont hydrophiles, ce qui les rend peu compatibles, il est nécessaire d'améliorer leur liaison à l'aide d'agents de couplage ou par un traitement chimique de la surface des fibres de bois [23].

Les agents de couplage créent des ponts entre les fonctions hydroxyle de la fibre de bois et les liaisons hydrogène du polymère [24]. Ces agents de couplage peuvent être organiques (amides et anhydrides), inorganiques (silicates) ou organométalliques (titanates) [25]. La proportion idéale de l'agent de couplage dans le composite devrait être d'environ 3% de la masse totale [26].

D'autres approches, telles que l'estérification, l'acétylation, ainsi que le traitement aux silanes, aux alcalins ou aux enzymes, peuvent également être utilisées pour assurer une liaison efficace entre les fibres de bois et la matrice polymérique [27].

Parmi les agents de couplage les plus utilisés, on retrouve les polyoléfines (PE ou PP) modifiées à l'acide maléique, les silanes, les isocyanates et certains phénol-formaldéhydes.

La figure 1.7 montre les deux types de réactions du polyéthylène maléique (PEMA) avec la cellulose.

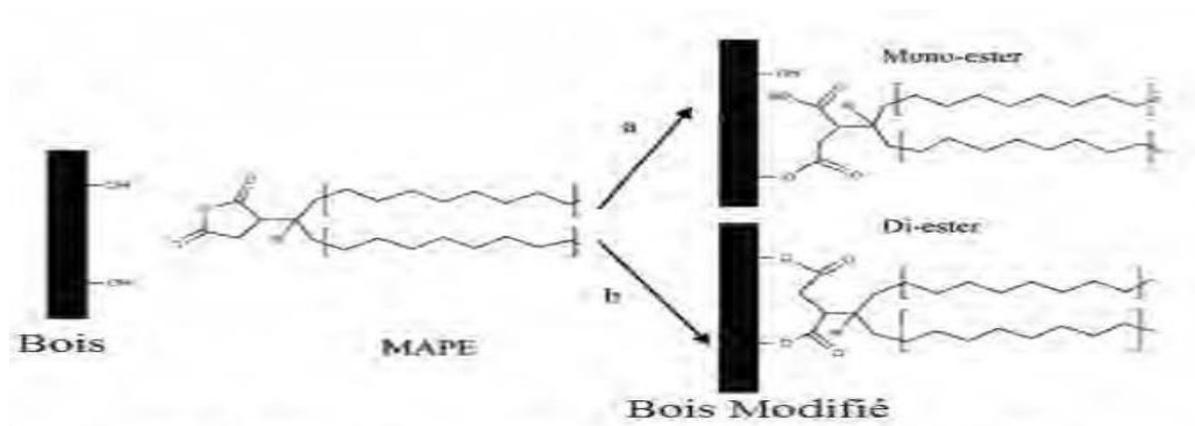


Figure 1.8 : Lien mono-ester (a) et di-ester (b) formé par le PEMA et les groupements hydroxyyles du bois ou de la cellulose [28]

1.2.5. Phénomène d'adsorption

Tout à fait, l'adsorption est un processus qui se produit lorsqu'un fluide est mis en contact avec un solide. Les molécules du fluide, appelé adsorbat, se fixent à la surface du solide, appelé adsorbant. La surface de l'adsorbant peut comporter des surfaces externes et internes formées par le réseau de pores et de cavités à l'intérieur du matériau.

Selon la nature des liaisons qui se forment lors de l'adsorption, celle-ci est divisée en deux types : l'adsorption physique et l'adsorption chimique.

- L'adsorption physique, également appelée physisorption, implique des interactions faibles entre les molécules de l'adsorbat et la surface de l'adsorbant. Ces forces d'interaction sont principalement des forces de Van der Waals. L'adsorbat est généralement facilement libéré de la surface de l'adsorbant.

- L'adsorption chimique, également appelée chimisorption, implique la formation de liaisons chimiques fortes entre l'adsorbat et la surface de l'adsorbant. Ce type d'adsorption est plus stable et nécessite souvent une énergie d'activation plus élevée pour libérer l'adsorbat de la surface de l'adsorbant.
- Les processus d'adsorption sont largement utilisés dans de nombreux domaines, tels que l'adsorption de gaz sur des surfaces solides, la purification de l'eau, la catalyse et bien d'autres applications industrielles et environnementales.

1.2.5.1. Adsorption physique ou physisorption

L'adsorption est dite physique lorsque les molécules du fluide (adsorbat) sont fixées à la surface de l'adsorbant par des liaisons de Van der Waals, qui sont des forces d'attraction faibles. Dans ce type d'adsorption, les molécules de l'adsorbat sont simplement adsorbées à la surface de l'adsorbant sans qu'il y ait de modification significative de la structure moléculaire de l'adsorbant. [29], [30].

1.2.5.2. Adsorption chimique ou chimie sorption

Dans le cas de l'adsorption chimique, des liaisons chimiques de valence se forment entre le fluide et le solide. L'énergie de liaison est largement supérieure à celle de l'adsorption physique. La chimisorption modifie les propriétés chimiques de l'adsorbant et est donc irréversible [29], [30]. Le processus d'adsorption est détaillé dans la section 1.5 pour le cas de l'oxydation à basse température des matières carbonées.

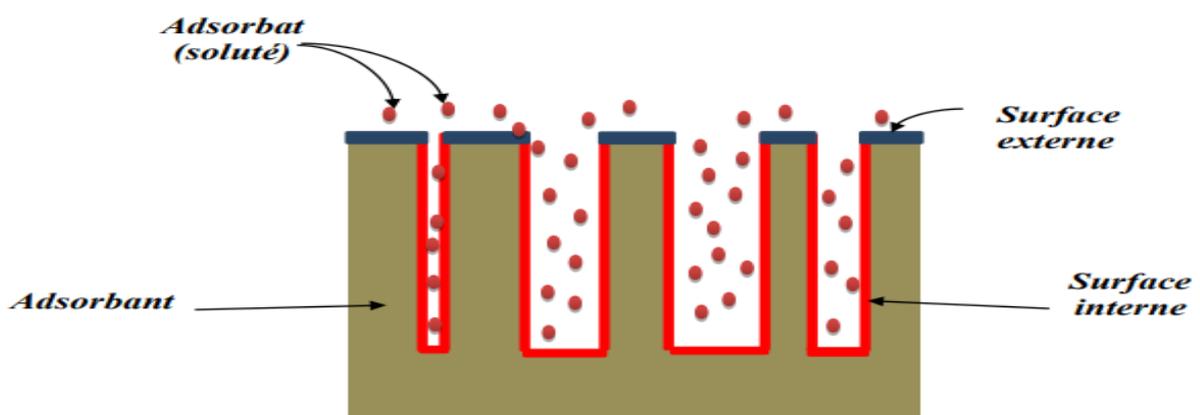


Figure 1.9 : Phénomène d'adsorption [31]

1.3. Traitement chimique des fibres végétales

Malgré de bonnes propriétés mécaniques, l'utilisation de fibres végétales est limitée en raison de leur caractère hydrophile et de leur faible stabilité thermique. Cependant, de nombreux travaux ont été réalisés pour exploiter leur utilisation dans des matériaux composites. L'adhésion entre les fibres et la matrice joue un rôle très important dans les propriétés finales de ces matériaux. En effet, si l'adhésion entre la fibre et la matrice est mauvaise, les propriétés mécaniques du composite diminuent. Ce problème est souvent lié au fait que les fibres végétales sont hydrophiles et polaires, alors que les polymères thermoplastiques couramment utilisés pour ces composites sont hydrophobes et apolaires.

Pour améliorer l'adhésion fibre/matrice et augmenter la stabilité thermique du composite, différents traitements, principalement au niveau des fibres, sont utilisés, notamment des traitements chimiques. Parmi les exemples de traitements chimiques, on peut citer le greffage par du silane, le traitement alcalin, le traitement à l'acide acétique, les molécules à base de benzoyl, d'isocyanate ou de triazine. Ces traitements chimiques visent à améliorer la dispersion et l'adhésion des fibres dans les matrices polymères.

Le traitement chimique entraîne une modification de la composition chimique des fibres (extraction des hémicelluloses, des pectines, etc.), une augmentation de la rugosité de la surface des fibres, une diminution de leur capacité de rétention de l'humidité, une modification de leurs propriétés mécaniques et une amélioration de leur stabilité thermique. L'affinité chimique entre les fibres et la matrice augmente avec la modification chimique des fibres. En réalité, ce traitement vise à modifier la cellulose. En effet, la zone cristalline de la cellulose est beaucoup moins accessible à l'attaque des réactifs que la zone amorphe.

Quelques exemples de traitements chimiques courants comprennent le traitement à la soude (NaOH), le traitement au permanganate ou au silane, l'acétylation et les prétraitements avec différents agents de couplage [31].

1.4. Traitement thermique des fibres de bois

1.4.1. Le séchage

Pour une meilleure stabilité du bois, les professionnels soumettent celui-ci à un séchage. Cette opération consiste à réduire la teneur en eau du bois à un niveau correspondant à la teneur en humidité d'équilibre propre à son utilisation (12 % à 19 % pour le bois destiné à des usages extérieurs et 9 % à 10 % pour des usages intérieurs). Ce traitement confère au bois une meilleure stabilité dimensionnelle,

une amélioration de ses propriétés mécaniques et de sa résistance aux agents biologiques. Il facilite également les opérations d'usinage et de collage.

En résumé, le séchage du bois est une étape essentielle réalisée par les professionnels pour améliorer ses performances et sa durabilité. En ajustant la teneur en humidité du bois, on limite les variations dimensionnelles et les risques de déformation, de fissures ou de gonflement excessif. Le bois sec devient plus rigide, résistant et durable, tout en étant moins sujet aux dégradations biologiques. De plus, sa manipulation, son usinage et son assemblage sont grandement facilités, ce qui en fait un matériau de choix pour de nombreuses applications, allant de la construction aux meubles en passant par d'autres utilisations diverses

1.4.2. Le séchage haut température

Le séchage conventionnel dépasse rarement 95°C, mais actuellement de nombreuses études sont entreprises sur les effets du séchage haute température jusqu'à 180°C, température considérée comme le début de la décomposition. Dans ce traitement, le bois est modifié de façon négligeable, le but étant de le sécher le plus rapidement possible. Dans ce type de séchage, la température dépasse le point d'ébullition de l'eau et se situe industriellement entre 110 et 150°C. La durée de séchage est réduite au quart de celle utilisée à moyenne température (50-95°C). Ceci est dû d'une part à l'augmentation des coefficients de diffusion avec la température et d'autre part à la surpression dans le bois liée à la pression de vapeur à ces températures. L'eau est alors expulsée du bois, d'abord sous forme liquide, puis sous forme gazeuse. La vitesse de migration est liée au rapport perméabilité sur surpression. À partir d'une certaine perméabilité, la surpression ne joue plus aucun rôle. En effet, pour certains bois à faible perméabilité comme le chêne, le séchage haute température n'est pas applicable [32]. Les gradients d'humidité sont plus élevés au cours du séchage à haute température, ce qui est susceptible de provoquer des déformations, mais la durée d'exposition est plus faible. De plus, à basse température, le bois a un comportement élastique, tandis qu'à haute température, le bois a dépassé son point de transition vitreuse et a un comportement plastique ; il n'y a alors pas de ruptures dans le bois, mais des déformations [32]. Cet auteur ne note pas de modifications notables dans les résistances mécaniques du sapin, mais annonce que des auteurs américains notent une légère dégradation au niveau de la flexion statique (5 %) pour des essais à 110-120°C. Pour diminuer les contraintes dans le matériau au cours d'un séchage, un traitement à la vapeur peut être réalisé [33]. Toutefois, ces traitements atteignent

des températures plus élevées et modifient la composition chimique du bois de façon plus ou moins importante, produisant ainsi un nouveau matériau.

1.4.3. Effet du traitement thermique des fibres de bois sur les propriétés physicomécaniques des composites bois-polymère

Les chercheurs ont étudié l'effet du traitement thermique des particules de bois à des températures de 120, 160 et 200°C sur les propriétés physico-mécaniques des CBP (composites à base de particules). Ils ont observé que la teneur en humidité des CBP avait diminué de manière significative avec l'augmentation de la température de traitement thermique, tandis que l'absorption d'eau et le gonflement de l'épaisseur des CBP avaient été réduits. Les images du MEB (Microscopie Électronique à Balayage) à la surface de rupture des CBP ont montré que la surface des particules de bois traitées thermiquement avait été sensiblement recouverte par la matrice polymère, ce qui signifie une amélioration de l'adhésion entre la particule de bois et la matrice polymère. D'autres chercheurs ont étudié l'effet de l'ajout de fibre traitée thermiquement à 120, 150 et 180°C sur les propriétés des CBP. Les résultats de l'étude ont montré que le traitement thermique avait diminué le module d'élasticité et la résistance maximale dans les essais de traction et de flexion. Cette étude a mis en évidence la relation entre la diminution des propriétés mécaniques des CBP après l'ajout de fibre traitée thermiquement et les formations chimiques des acides solubles, tels que l'acide formique et l'acide acétique, issus de la dégradation de l'hémicellulose. Ces acides accélèrent la dépolymérisation de la cellulose en décomposant les chaînes longues de la cellulose (structure cristalline) en chaînes plus courtes. De plus, les liaisons C-C et C-O se coupent au niveau de l'intra-polymère avec l'augmentation de la température et du temps de traitement. Cela conduit à la séparation du système de copolymère lignine-hémicellulose et à la dépolymérisation des hémicelluloses et de la cellulose amorphe. La dépolymérisation et le raccourcissement du polymère de cellulose pourraient affecter le MOE (Module d'Élasticité) et le MOR (Module de Rupture) du bois. Les chercheurs ont noté que l'ajout de fibre traitée à 450°C au CBP avec une matrice de PP (polypropylène) avait augmenté les valeurs du MOE en flexion et en traction. Les proportions de fibres utilisées dans cette étude étaient de 6, 12, 18, 24 et 30% en poids ; les CBP contenant 24% de fibre traitée ont donné la plus grande valeur de MOE, qui est égale à 3,5 GPa. D'autres études similaires ont trouvé des valeurs de MOE égales à 1,4 GPa et 2,8 GPa [34].

1.4.4. Effet du traitement thermique sur l'hygroscopicité et la chimie de surface des CBP

L'hygroscopicité des CBP (composites à base de particules),

Contenant des fibres de bois traitées thermiquement est moins élevée que celle des CBP à base de fibres non traitées.

Cette résistance à l'eau des CBP contenant des fibres de bois traitées thermiquement est principalement attribuée à des hémicelluloses hydrolysées au cours du traitement thermique. L'absorption d'eau observée est due à la liaison hydrogène des molécules d'eau avec les groupements hydroxyles libres présents dans les composants de la paroi cellulaire de cellulose, ainsi qu'à la diffusion des molécules d'eau à l'interface matrice-charge.

La diminution du gonflement en épaisseur des CBP peut être attribuée à l'augmentation de la cristallinité de la cellulose, à la dégradation des régions amorphes dans les micro-fibrilles ou à la réduction des groupements hydroxyles après le traitement thermique. La réticulation entre les polymères de la paroi cellulaire, en particulier de la lignine, l'estérification entre les micro-fibrilles de cellulose, et la formation de liaisons éther entre deux groupements hydroxyles adjacents sont d'autres raisons qui aboutissent à la perte de gonflement.

Dans une étude sur les CBP à base de farine de charbon de bois, il a été constaté que l'amélioration de la stabilité dimensionnelle peut s'expliquer par le fait que le charbon de bois contient de nombreux pores dans sa structure et ils suggèrent que ces pores ont été remplis par le polypropylène fondu. Ces résultats ont confirmé ceux trouvés par Li et al. Dans cette étude, ils ont étudié l'effet de l'incorporation du charbon de bambou dans les CBP sur l'absorption d'eau. Avec l'augmentation de la teneur en charbon de bambou, la résistance à l'eau a augmenté. Les pores dans la structure du charbon ont été remplis par le polyéthylène basse densité (PEBD), puis le charbon a rempli les espaces entre les fibres de bois et le PEBD, ce qui permet au polyéthylène de couvrir encore plus la surface des fibres de bois, entraînant une forte adhésion. Cela permet d'avoir une bonne résistance à l'eau.

Dans une autre étude, on a étudié l'effet de l'extraction de l'hémicellulose des fibres de pin des marais par l'eau chaude, à 3 températures différentes (140, 155 et 170 °C) sur l'hygroscopicité des CBP. Ils ont constaté une amélioration au niveau de la résistance à l'eau, ce qui indique une diminution de l'hygroscopicité des CBP. La raison principale est

l'extraction de l'hémicellulose qui entraîne la réduction des groupements hydroxyles et de l'hygroscopicité du bois. La concentration de la lignine à la surface des fibres de bois après l'extraction de l'hémicellulose est une autre raison de la diminution de l'hygroscopicité des CBP.

La mesure de l'angle de contact permet de caractériser le caractère hydrophobe ou hydrophile des composites à base de bois. Par exemple, on a étudié l'effet de l'acétylation des fibres de bois sur l'angle de contact et l'absorption de l'eau des composites bois-polypropylène. Ils rapportent que l'acétylation augmente l'angle de contact mais réduit le gonflement en épaisseur des composites [35].

1.5. Recyclage des déchets plastiques

Actuellement, les méthodes les plus courantes d'élimination des déchets sont la mise en décharge ou l'incinération, cette dernière étant utilisée pour récupérer de l'énergie. Cependant, en raison d'une législation de plus en plus stricte et de la faible biodégradabilité des polymères couramment utilisés, l'enfouissement devient de moins en moins populaire [36],[37]. Il est important de noter que la récupération de chaleur en brûlant des déchets plastiques peut produire des gaz toxiques et des cendres contenant du plomb et du cadmium. D'un point de vue économique, l'incinération est également considérée comme une méthode inefficace [38],[39]. Par conséquent, le recyclage semble être la meilleure solution pour faire face à ces problèmes environnementaux.

1.5.1. Définition de recyclage

Le recyclage est un procédé de traitement des déchets basé sur la technologie de valorisation des déchets après leur collecte. Il vise à réintroduire dans le cycle de production du produit des matériaux ou des résidus de fabrication qui composent un produit similaire arrivé en fin de vie utile [37], [40].

1.5.2 Statistiques sur le recyclage

Sur le vaste spectre des résines synthétisées et utilisées, seul le polyéthylène, le polypropylène et le PET sont recyclés de manière directe en Amérique du Nord. Toutefois, le taux de réutilisation est relativement faible puisqu'il atteint aujourd'hui une valeur maximale de 30% pour des applications d'emballage. Le reste des résines est enfoui, incinéré ou exporté vers les pays d'Asie.

De manière générale, les polymères ne sont pas en tête en termes de recyclage. En 2007, le recyclage du plastique se situe en cinquième position avec un taux de 21%, après l'acier à 100%, le verre à 75%, le papier-carton à 56% et l'aluminium à 28%. Ces pourcentages sont relativement élevés dans les pays développés, comme l'exemple de l'Allemagne, où même les pots de yaourts, les barquettes et les films en plastique sont recyclés. Dans les pays en développement tels que l'Algérie, hormis la récupération interne, le recyclage et la récupération du plastique relèvent du secteur informel [41].

1.6. Le recyclage du bois

Le recyclage du bois consiste à récupérer les déchets de bois usés afin d'obtenir de nouveaux produits de consommation tels que des granulés pour appareils de chauffage domestique, des palettes recyclées, etc. Ce recyclage permet de fabriquer différents objets ou matériaux tels que du papier et du carton, des panneaux, des meubles, des palettes et des litières animales.

Tout d'abord, les différentes pièces de bois à recycler sont triées, manuellement ou mécaniquement, selon leur taille et leur niveau de traitement. Ensuite, les morceaux de bois sont concassés puis broyés. L'objectif est d'éliminer les matières indésirables telles que les clous, les agrafes, etc. [42].

CHAPITRE 02
MATÉRIELS
ET
MÉTHODES

2. Appareillages et conditions expérimentales

2.1. Objectif de travail

La réalisation des panneaux composites polymère-bois vise à répondre aux exigences techniques équivalentes à celles des produits commercialisés sur le marché, qu'ils soient issus de matériaux conventionnels tels que les panneaux agglomérés obtenus par compression des déchets industriels de bois ou bien des panneaux d'agglomérés fabriqués à partir des déchets de bois de vieux meubles. Le processus comprend les étapes suivantes :

1. Préparation des formulations des composites en tenant compte des objectifs visés.
2. Malaxage ou mélange des formulations à l'aide de machines de transformation, telles que l'extrusion et le laminage.
3. Élaboration des matériaux finis et mise en œuvre par la technique de moulage par compression.
4. Réalisation des tests recommandés par l'étude pour évaluer les propriétés et la performance du matériau final.

L'objectif est de produire des panneaux composites polymère-bois de qualité équivalente à ceux disponibles sur le marché, tout en exploitant efficacement les déchets de bois et en offrant des solutions plus durables et respectueuses de l'environnement.

2.2. Les procédures préparation des échantillons

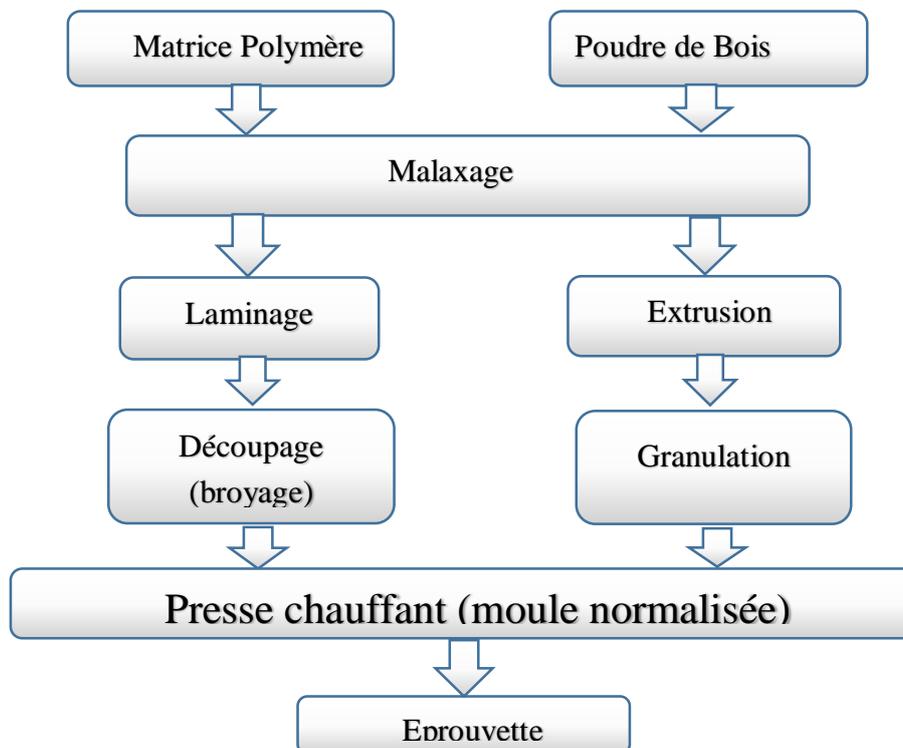


Figure 2.1 : Plan de préparation des échantillons

2.3. Matériaux utilisés

Le composite bois-polymère contient des poudres de bois de saule blanc ainsi que deux polymères : le polypropylène (PP) et le polyéthylène haute densité (PEHD).

2.3.1. Poudre de bois des arbres de saule ou peuplier

La sciure de bois utilisée dans la préparation du Composite Bois-Polymère (CBP) provient d'arbres de saule blanc, tels que le saule pleureur et le peuplier, appartenant à la famille des salicacées. Les fibres de bois de saule sont extraites de l'écorce ou des tiges des arbres et peuvent être utilisées de nombreuses façons, notamment dans la production de panneaux de particules, de panneaux de fibres de densité moyenne et d'autres produits en bois.

L'objectif de ce travail est d'intégrer une charge de bois provenant de déchets ou de résidus abandonnés, ce qui peut entraîner de nombreuses complications environnementales. La contribution de ce travail réside dans le recyclage et la réutilisation de cette source végétale inerte, contribuant ainsi à une approche plus durable de l'utilisation des ressources naturelles.



Figure 2.2 : Photo présente le bois d'arbre de saule

2.3.2. La matrice polymérique

Deux types de polymères ont été utilisés dans la réalisation de ce travail :

2.3.2.1. Le polypropylène (PP)

Le polymère PP commercial utilisé est le TASNEE PP H4120 POLYPROPYLENE. Il s'agit d'un homopolymère de polypropylène avec un indice de fusion de 12 g/10 min. Le polypropylène (PP) est un polymère thermoplastique qui devient souple et malléable lorsqu'il est chauffé, ce qui le rend facilement recyclable. Il dispose d'une bonne brillance, d'une excellente fluidité et de bonnes propriétés mécaniques.

Grâce à ses caractéristiques, le polypropylène permet de réaliser des formes semi-rigides avec une bonne tenue à chaud (110°C à 130°C).

Il présente également une bonne résistance à la flexion, ce qui le rend adapté à de nombreuses applications dans diverses industries.

2.3.2.2. Le polyéthylène haute densité (PEHD)

Le polyéthylène haute densité (PEHD) commercial utilisé est le Hostalen CRP 100 BLACK. Il s'agit d'un polyéthylène haut densité (PEHD) de couleur noire, caractérisé par une viscosité élevée à l'état fondu, ce qui le rend adapté pour le moulage par extrusion, injection et compression. Le produit est classé PE 100.

Le polyéthylène haut densité est un polymère thermoplastique qui devient souple et malléable lorsqu'il est chauffé, le rendant facilement recyclable. Il permet de réaliser des formes semi-rigides et présente une bonne tenue au froid, ainsi qu'une résistance élevée aux produits chimiques.

Ce type de polyéthylène offre d'excellentes propriétés de résistance à la fissuration sous contrainte et une très bonne résistance hydrostatique à long terme, ce qui le rend adapté à de nombreuses applications

2.3.2.3. Fiche technique des matrices utilisées

Tableau 01 : fiche technique de polypropylène (PP)

Propriété Physique	Méthode	Valeur
Taux de fusion (230 °C/2,16 kg)	ISO 1133	12g/10min
Température de fusion	ISO 11357-3	163°C
Température de ramollissement Vicat	ISO 306	152°C
Température de distorsion thermique à 0,45 MPa	ISO 75-2	0.9g/cm ³
Propriété Mécanique	Méthode	Valeur
Résistance à la traction	ISO 527-2	33MPa
Allongement à la traction	ISO 527-2	10 %
Module de flexion	ISO 178	1400MPa
Résistance aux chocs Charpy	ISO 179/1Ea	3.0KJ/m
Dureté Rockwell	2039-2	100R

Tableau 02 : fiche technique de polyéthylène haute densité (PEHD)

Propriété Physique	Méthode	Valeur
Début de font (190 °C/5.0 kg)	ISO 1133-1	0.23 g/10 min
(190 °C/21.6 kg)	ISO 1133-1	6.4 g/10 min
Densité	ISO 1183-1	0.959 g/cm ³
Densité apparente	ISO 60	580 kg/m ³
Propriété Mécanique	Méthode	Valeur
Module de fluage en flexion		
(chargement 4 points / 1 min)	DIN 16841	1200 MPa
(chargement en 4 points / 24 h)	DIN 16841	560 MPa
(chargement en 4 points / 2000 h)	DIN 16841	330 MPa
Module de traction, (23 °C)	ISO 527-1,-2	1100 MPa
Contrainte de traction au rendement, (23 °C, 50 mm/min)	ISO 527-1, -2	23 MPa
Contrainte de traction à la rupture, (23 °C)	ISO 527-1, -2	>=350 %
Déformation en traction au rendement, (23 °C, 50 mm/min)	ISO 527-1, -2	8 %
Résistance aux chocs Charpy – Entaillé		
(23 °C)	ISO 179-1/1eA	26 kJ/m ²
(-30 °C)	ISO 179-1/1eA	13 kJ/m ²
Additif		
Teneur en noir de carbone	ISO 6964	2.25 %

2. 3.3 Méthodes de préparation de CBP

2.3.3.1. Préparation de poudre de saule

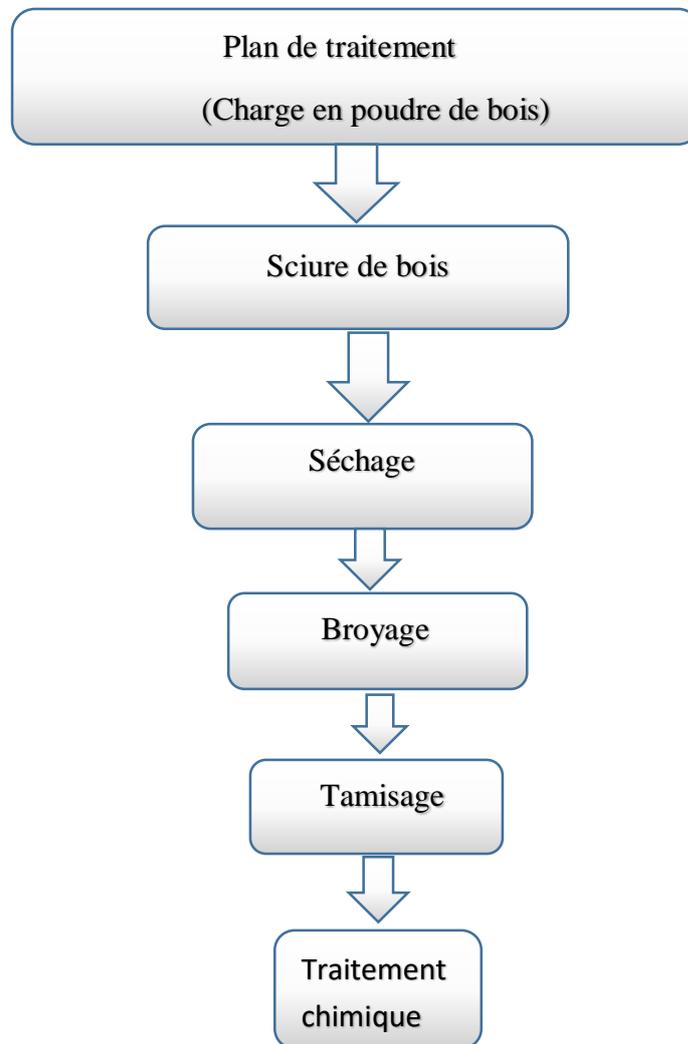


Figure 2.3 : Plan de traitement de charge en poudre de bois

La préparation de la poudre de saule a été réalisée pour améliorer ses propriétés, augmenter sa durabilité et le protéger contre les attaques de parasites et de champignons. Ces fibres ont été obtenues à partir des déchets des scieries (voir Figure 2.3) et préparées par 3 méthodes de traitement :

- Traitement thermique,
- Traitement mécanique,
- Traitement chimique.



Figure 2.4 : Déchet de bois de saule blanc

2.3.3.2. Traitement thermique :

L'étape de séchage des particules de bois est importante pour se débarrasser de l'humidité qu'elles contiennent. Les particules de bois sont séchées à une température de 200°C dans un four à étuve à ventilation naturelle, pendant 6 heures.

Un échantillon de 15 grammes est prélevé et séché au four pendant 6 heures. Pendant cette période, le poids de l'échantillon est mesuré toutes les heures afin de suivre l'évolution de la perte d'humidité et de déterminer le moment où il atteint un niveau de séchage optimal. Ce processus est essentiel pour obtenir des particules de bois sèches qui peuvent être utilisées de manière efficace dans la fabrication du composite bois-polymère.

Tableau 0 3 : effet de traitement thermique

le temps	Le poids
t_0	15 gramme
1 heure	13 gramme
2 heures	11 gramme
3 heures	10.80 gramme
4 heures	10.40 gramme
5 heures	10.40 gramme
6 heures	10.40 gramme

2.3.3.3. Traitement mécanique

Après le traitement thermique des sciures de bois, elles sont broyées dans un broyeur spécial. Le produit final obtenu est une poudre avec différentes coupes granulométriques.

Dans cette étude et ce projet, nous utilisons deux types de poudre de saule qui ont été obtenues par tamisage. Ces poudres sont présentées dans la Figure (2.4). La première poudre a une granulométrie de 400 μm et la deuxième de 500 μm .

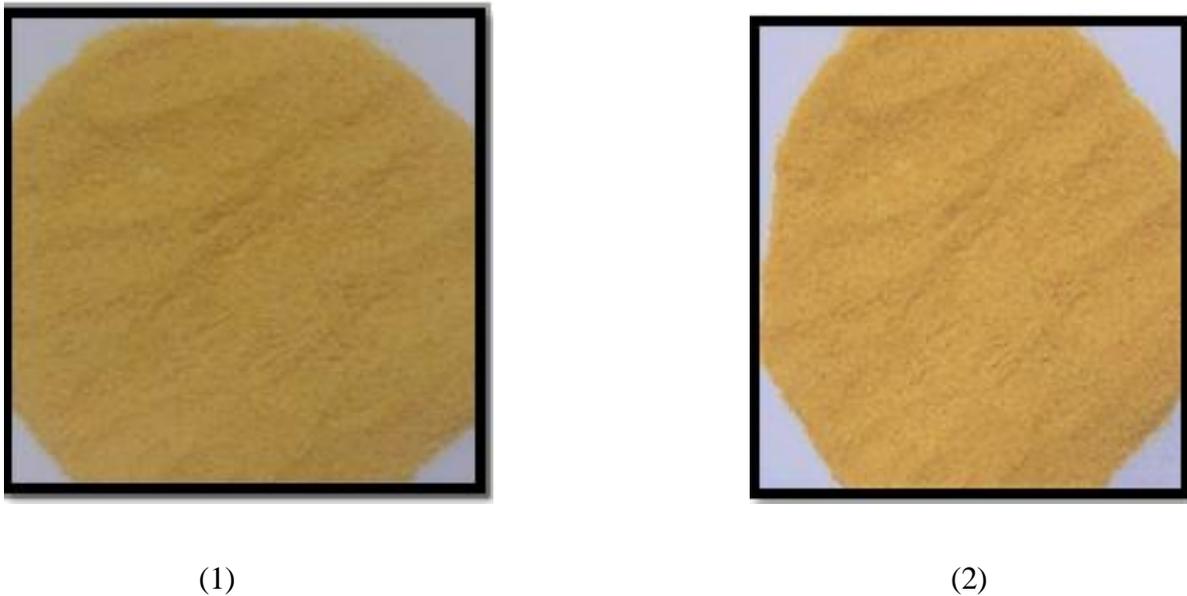


Figure 2.5 : poudre de bois utilisé (1) granulométrie de 400 μm et (2) granulométrie de 500 μm

2.3.3.4. Traitement chimique (Traitement surface)

Ce processus est très important car il permet de traiter la surface des particules de poudre de saule. Pour ce faire, les particules de poudre de saule sont mélangées avec de l'acide stéarique qui a été dissous dans une solution de Toluène.

L'acide stéarique est un acide gras qui présente des propriétés hydrophobes, c'est-à-dire qu'il repousse l'eau. En mélangeant les particules de saule avec de l'acide stéarique dissous dans le Toluène, on recouvre la surface des particules avec une fine couche hydrophobe d'acide stéarique.

Ce traitement de surface est essentiel car il améliore l'adhésion entre les particules de saule et la matrice polymère dans le composite bois-polymère. Il permet également de renforcer la

résistance aux attaques de parasites et de champignons, ainsi que d'améliorer la stabilité dimensionnelle du matériau final. En somme, ce processus améliore les propriétés globales du composite bois-polymère et contribue à en augmenter la durabilité.

2.3.3.5. Effet de Traitement de surface

Lors de ce traitement, la liaison entre les particules de bois et le polymère est améliorée. En effet, le lien entre la matrice thermoplastique (hydrophobe) et les renforts de poudre de bois (hydrophiles) est souvent peu compatible.

Grâce au traitement chimique de la surface de la poudre de bois, l'acide stéarique joue le rôle de ponts entre les fonctions hydroxyles des particules de bois et les liaisons hydrogène du polymère. Cela favorise une meilleure adhérence et compatibilité entre les deux matériaux, améliorant ainsi les propriétés globales du composite bois-polymère.

En somme, ce traitement permet d'obtenir un matériau composite plus homogène et renforcé, avec une meilleure intégration entre les particules de bois et la matrice polymère, ce qui contribue à améliorer les performances et la durabilité du produit final

2.3.3.6. La densité apparente de bois de saule

La mesure du taux de compression, ou l'inverse du taux de foisonnement, de la poudre de bois a montré une valeur de 35 %. Ce taux de compression peut être utilisé comme indice de chargement ou comme taux maximal limite de charge de bois à incorporer dans les composites préparés, tels que PP/PB et PEHD/PB.

La masse volumique apparente moyenne de la poudre de bois est de 0.210 g/cm³. Cette caractéristique physico-chimique ne doit pas être négligée, car elle nous renseigne sur la légèreté du matériau composite préparé en termes de poids. Les panneaux composites auront une faible densité par rapport aux panneaux de laine de bois et autres similaires, qui sont quasiment plus denses.

2.4. Les types de mélange

Pour chaque type de mélange, différents pourcentages de fibre de saule ont été ajoutés afin d'observer l'évolution des caractéristiques mécaniques et physiques du composite en fonction du taux de renfort.

En variant les pourcentages de fibre de saule incorporée dans les composites, on peut analyser comment ces renforts affectent les propriétés du matériau final. Cela permet de déterminer la meilleure proportion de renfort à utiliser pour obtenir les performances mécaniques et physiques souhaitées dans le composite bois-polymère.

Tableau 04 : type de mélange (PB + PP)

Type de mélange	Coupe granulométrique de poudre de bois μm	Percentage de matrices %	Percentage de poudre de bois %
PB + PP	400	60	40
		40	60
		50	50
	500	60	40
		40	60
		50	50

Tableau 05 : type de mélange (PB + PEHD)

Type de mélange	Coupe granulométrique de poudre de bois μm	Percentages de matrices %	Percentages de poudre de bois %
PB+ PEHD	400	60	40
		40	60
			50
	500	60	40
		40	60
		50	50

2.5. Méthodes de préparation des mélanges CBP

2.5.1. Les procédures pour fabrication du Matrice polymère

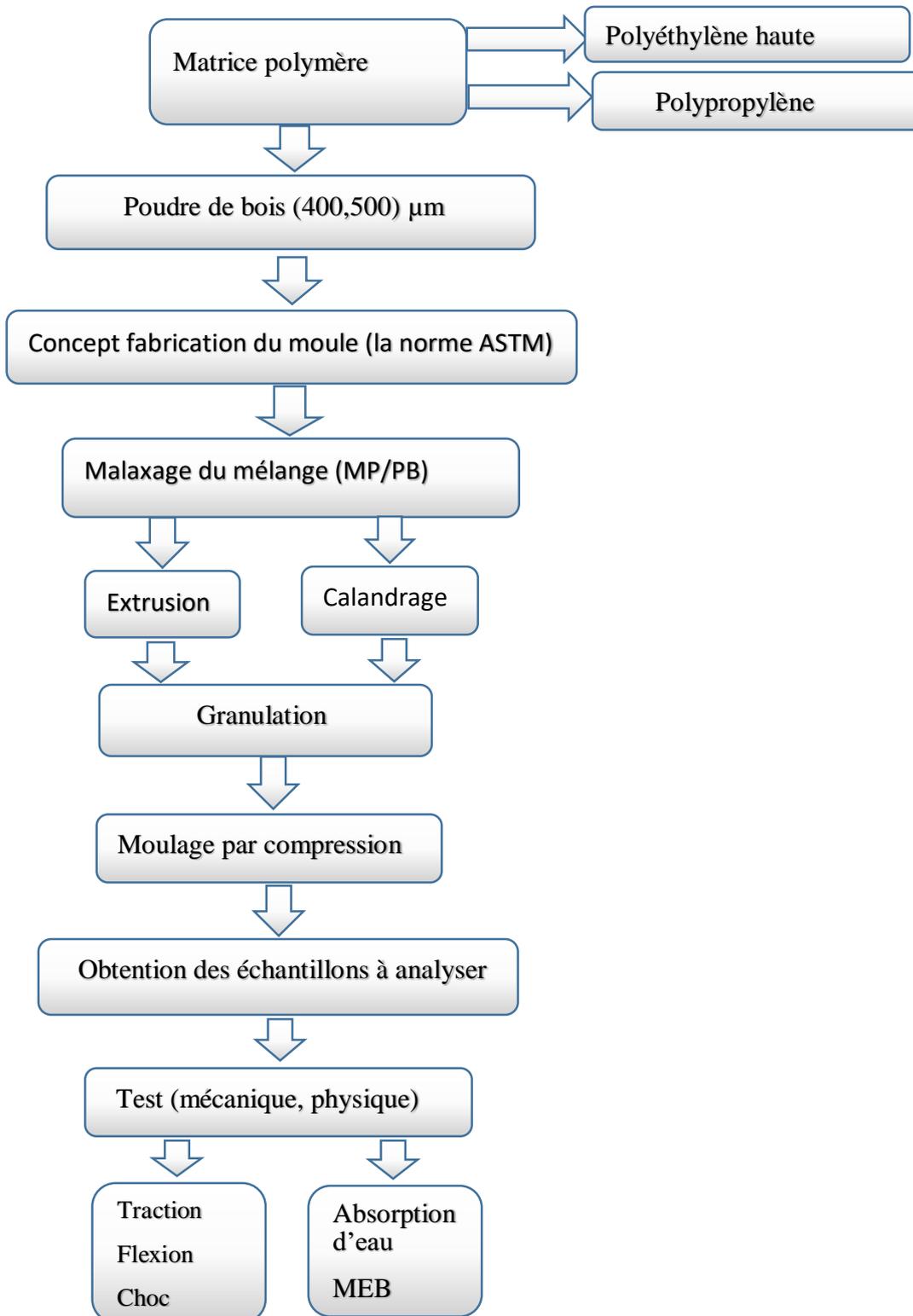


Figure 2.6 : La procédure pour fabrication du Matrice polymère /poudre de bois

La préparation des mélanges de CBP (composite bois-polymère) et des spécimens utilisés dans les différents tests est réalisée par extrusion et calandrage.

2.5.1.1. Préparation des mélanges PP/PB par l'extrusion

On a fabriqué les granules bois-polymère à l'aide d'une extrudeuse mono-vis de modèle TEDERIC (voir Figure 2.7). Après cela, le CBP sous forme de filament est refroidi avec de l'eau et découpé par une granuleuse rotative.

La température de mélange des composants (PP + PB) est maintenue à 180 °C, et la vitesse de mélange est réglée à 100 rpm (tours par minute).



Figure 2.7 : extrudeuse mono-vis (modèle TEDERIC)

2.5.1.2. Préparation des mélanges PEHD/PB par calandrage ou laminage dans un Mélangeur à deux cylindres

On a fabriqué les granules PEHD/PB à l'aide du mélangeur à deux cylindres (RODOLFO COMERIO-ITALIA) à une température de 190°C (voir Figure du mélangeur). Par la suite, les plaques ont été séchées à température ambiante (23°C).

Ensuite, ces plaques ont été coupées et broyées à l'aide d'un broyeur pour obtenir les granules PEHD/PB. Ces granules ont ensuite été utilisés pour fabriquer les éprouvettes utilisées dans les essais normalisés.

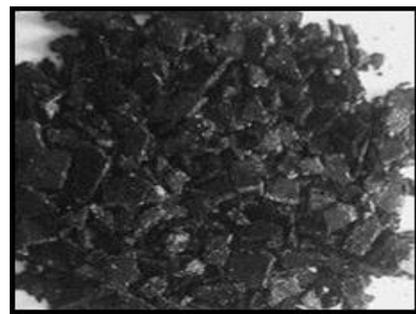


Figure 2.8 : mélangeur à deux cylindres (RODOLFO COMERIO-ITALIA)

Ensuite, les granules de CBP et les pellets obtenus ont été utilisés pour fabriquer les éprouvettes d'essais normalisées (voir Figure 2.9).



(1)



(2)

Figure 2.9 : les granules bois-polymère (1) PB + PP et (2) PB + PEHD

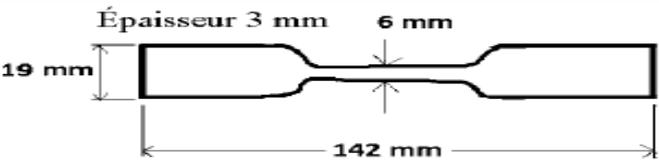
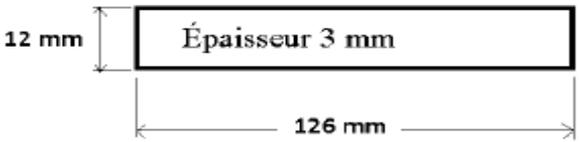
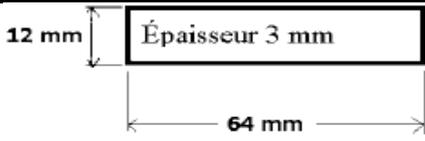
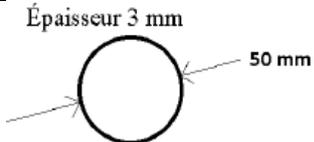
2.5.1.3 Préparation de moule sur norme ASTM

Les éprouvettes de traction et de flexion ont été utilisées pour mesurer la résistance maximale, le module d'élasticité, l'énergie de rupture et la déformation du composite bois-polymère. Pour évaluer la résistance aux chocs, l'énergie d'impact a été mesurée en utilisant la méthode Charpy. De plus, la stabilité dimensionnelle du matériau a été évaluée en mesurant l'absorption d'eau et le gonflement.

Toutes les mesures ont été effectuées conformément aux normes ASTM en vigueur (voir Tableau 5), et les éprouvettes ont été préparées à l'aide d'une machine CNC (voir Figure 2.8).

La machine CNC (Commande Numérique par Calculateur) permet de réaliser des découpes précises et standardisées pour obtenir les formes spécifiques requises pour les essais normalisés. Ainsi, les éprouvettes ont été préparées avec une grande précision et conformément aux normes ASTM, garantissant ainsi des résultats fiables et comparables pour l'évaluation des propriétés du composite bois-polymère.

Tableau 06 : les normes et les dimensions d'essais physiques et mécaniques réalisés sur CBP

Tests	Norm	Dimension
Traction simple	ASTMD638	
Flexion point	ASTMD790	
Impact Choc Charpy	ASTMD4812	
Immersion d'eau	ASTM D 570	

De prime abord, nous avons fabriqué un moule contenant plusieurs types de spécimens destinés à être testés (voir Figure 2.10). Ce moule a été réalisé en collaboration avec l'entreprise Master Forage, utilisant une machine de coupe CNC à plasma.



Figure 2.10 : moule sur la norme ASTM d'essais physiques et mécaniques utilisant pour préparés des éprouvettes

2.5.1.4. Etape de remplissage du moule avant compression

Après avoir fabriqué les granules de CBP, nous introduisons ces granulés dans un moule conforme à la norme ASTM (voir Figure 2.11).



Figure 2.11 : les granulés de CBP dans moule norme ASTM

La matière sous forme de granulés des mélanges est introduite dans le moule pour fabriquer les éprouvettes (voir Figure 3.2). La mise en forme des éprouvettes est réalisée à l'aide d'une presse thermo-hydraulique manuelle (voir Figure 2.12).

Les paramètres utilisés pour le moulage des éprouvettes sont les suivants :

1. Pour le CBP (PP + PB) : les granulés sont injectés à une température de 180°C avec une pression hydraulique de 20 KN pendant une durée de 15 minutes.
2. Pour le CBP (PEHD + PB) : les granulés sont injectés à une température de 195°C avec une pression hydraulique de 25 KN pendant une durée de 15 minutes.

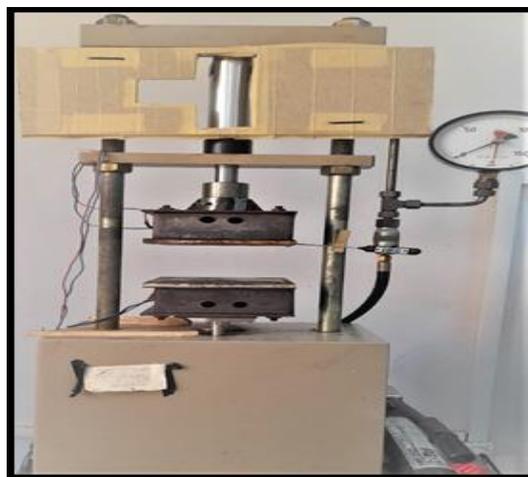


Figure 2.12 : machine manuelle de presse thermo hydraulique.



(1)



(2)

Figure 2.13. : Éprouvettes d'essais normalisées : 1 (PP +PB) et 2 (PEHD +PB). A) pour le test de traction ;

B) pour le test flexion ; C) pour le test d'impact ; D) pour Immersion d'eau.

2.6. Caractérisation des composites bois-polymère

2.6.1. Caractérisation des propriétés mécaniques

2.6.1.1. Essais de traction

L'essai de traction consiste à appliquer une force progressive sur l'éprouvette à une vitesse spécifiée afin de déterminer la déformation du matériau. Cet essai permet de caractériser les propriétés mécaniques du matériau, notamment le module d'élasticité E (en MPa), également appelé module de Young. Le module d'élasticité est une constante qui relie la contrainte de traction à la déformation dans le domaine de déformation élastique, et il nous donne une idée de la rigidité du matériau.

Ensuite, l'essai de traction permet également de déterminer la résistance à la traction R_M (en MPa), qui correspond à la force maximale que le matériau peut supporter avant de se rompre, ainsi que l'allongement à la rupture ET (en %), qui indique la déformation finale du matériau au moment de la rupture. Ces paramètres sont importants pour évaluer la résistance et la ductilité du matériau.

Les équations utilisées pour définir ces paramètres sont les suivantes :

$$MOE_t = \frac{F_p}{b.h.\epsilon_t} \quad (1.1)$$

$$R_m = \frac{F_m}{b.h} \quad (1.2)$$

$$\epsilon_r = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (1.3)$$

Où,

F_m : Force maximale (N)

F_p : Force mesurée à la limite proportionnelle (N)

L₀ : Longueur initiale (mm)

b : Largeur de l'échantillon (mm)

h : Épaisseur de l'échantillon (mm)

ΔL : Allongement (mm)

Les essais de traction ont été réalisés à l'aide d'une machine d'essai électronique universelle JINGMI WDR-W d'une capacité de 20 kN (voir Figure 2.14). Les essais ont été réalisés conformément à la norme ASTM D630.

Les éprouvettes de traction utilisées sont de type IV, avec des dimensions spécifiées dans le tableau 06. La vitesse d'essai était de 5 mm/min, ce qui signifie que la force a été appliquée progressivement à une vitesse de 5 millimètres par minute.

Pour chaque mélange de composite bois-polymère, 3 éprouvettes ont été testées afin d'obtenir des mesures reproductibles et de garantir la fiabilité des résultats. En utilisant plusieurs éprouvettes pour chaque mélange, nous pouvons obtenir une moyenne des valeurs mesurées, ce qui contribue à minimiser les effets d'éventuelles variations aléatoires et à obtenir des données plus représentatives des propriétés mécaniques du matériau.



Figure 2.14 : Machine d'essai universelle JINGMI WDR-W de capacité 20 kN

Avec le dispositif d'essai de traction.

2.6.1.2. L'essai de flexion

L'essai de flexion consiste à déterminer le module d'élasticité MOEr (en MPa), la résistance R (en MPa) ainsi que la déformation maximale en flexion en appliquant une charge au milieu d'une éprouvette reposée sur deux appuis.

Les relations suivantes permettent de calculer ces paramètres :

$$MOE_f = \frac{FL^3}{4 \delta bh^3} \quad (1.4)$$

$$R_{mf} = \frac{3F_m L}{2bh^2} \quad (1.5)$$

$$\varepsilon_f(\%) = \frac{6R_{mf} \cdot h}{L^2} \quad (1.6)$$

L : Longueur entre appuis (mm)

B : Largeur (mm)

F : Force mesurée à la limite proportionnelle (N)

H : Épaisseur (mm)

Δ : Déflexion (mm)

F_m : Force maximale mesurée (N)

Les essais de flexion ont été réalisés conformément à la norme ASTM D700 (voir Tableau 06) en utilisant une machine d'essai universelle Zwick/Roell ZD60, fabriquée en Allemagne, d'une capacité de 5 kN. La distance entre les appuis sur laquelle repose l'éprouvette est de 80 mm, et la vitesse d'application de la charge est de 5 mm/min.

Pour chaque mélange de composite bois-polymère, trois éprouvettes ont été testées afin de garantir la reproductibilité et la fiabilité des résultats. En utilisant trois éprouvettes pour chaque mélange, nous pouvons obtenir une moyenne des valeurs mesurées, ce qui permet de minimiser les effets des variations aléatoires et d'obtenir des données plus représentatives des propriétés mécaniques du matériau.



Figure 2.15 : Machine d'essais traction et flexion d'universelle Zwick/Roell ZD60 de capacité 5 kn

2.6.1.3. Test d'impact choc

Le test d'impact permet de mesurer la résistance au choc d'un matériau et d'évaluer sa ténacité. Pour réaliser ce test, nous utilisons un dispositif appelé "mouton pendule" avec un pendule de 2,75 joules. Le pendule est libéré d'une certaine hauteur, ce qui entraîne la rupture

de l'éprouvette tout en continuant son mouvement jusqu'à atteindre une hauteur inférieure à la hauteur initiale. La résilience du matériau, exprimée en kJ/m², est ensuite mesurée à partir de la relation suivante :

$$a_i v = \frac{E_c}{b \cdot h} * 1000 \quad (1.7)$$

$a_i v$: Résistance au choc d' éprouvettes lisses en kJ/m²

b: Largeur de l' éprouvette (mm) ;

h : Épaisseur de l'éprouvette (mm) ;

E_c : Énergie absorbée (J).

Les tests d'impact ont été réalisés conformément à la norme ASTM D 4814 (voir Tableau 06). La machine utilisée pour ces essais est un mouton pendule, modèle CEAST 9050.

Pour chaque formulation de composite bois-polymère, trois éprouvettes ont été testées. Cette approche garantit la reproductibilité des résultats et permet d'obtenir une moyenne des valeurs mesurées, ce qui réduit les effets des variations aléatoires et donne des données plus fiables sur la résilience du matériau.

Le test d'impact selon la norme ASTM D 4814 permet de caractériser la capacité du composite à résister aux chocs et à absorber l'énergie en cas d'impact violent. Les résultats de ces essais sont importants pour évaluer la résistance du matériau dans des conditions réelles, notamment dans des applications où le matériau peut être soumis à des chocs ou des charges dynamiques.



Figure 2.16 : Machine Mouton pendule, modèle CEAST 9050 utilisée pour l'essai d'impact

2.6.2. Caractérisation des propriétés physiques

2.6.2.1. Absorption d'eau

L'absorption par capillarité est une propriété hydrique qui mesure la capacité d'un matériau à absorber une certaine quantité d'eau par unité de temps et de surface, lorsque seule une face est en contact direct avec de l'eau. Le coefficient d'absorption d'eau par capillarité est exprimé en $g/m^2 \cdot s^{0.5}$. Pour déterminer le coefficient d'absorption d'eau par capillarité, on réalise une courbe reliant la quantité d'eau absorbée par unité de surface à la racine carrée du temps. Ensuite, la pente de la régression linéaire de cette partie de la courbe est calculée, ce qui donne le coefficient d'absorption d'eau par capillarité.

$$C_{w,s} = \frac{m_{s0,s} - m_{dry,s}}{A_s \sqrt{t_{s0}}} * 10^3 \quad (1.8)$$

Où

$C_{w,s}$: coefficient d'absorption d'eau par capillarité, en $kg/m^2 \cdot h^{1/2}$;

$m_{s0,s}$: masse de l'éprouvette après immersion pendant un temps t , en g ;

$m_{dry,s}$: masse de l'éprouvette après séchage, en g ;

A_s : surface brute de la face de l'éprouvette immergée dans l'eau, en mm^2 ;

t_{s0} : temps d'immersion, en s

Les essais d'absorption d'eau ont été réalisés en utilisant des éprouvettes de dimensions 50 mm x 3 mm (conformément au Tableau 06). Tout d'abord, chaque éprouvette est pesée pour déterminer sa masse sèche initiale.

Ensuite, les éprouvettes sont placées dans un bac en verre de manière à ce qu'une face de la pierre soit constamment en contact avec de l'eau. Pendant toute la durée de l'essai, des pesées des éprouvettes sont effectuées à des intervalles de temps définis par la norme.

L'objectif de ces essais est de mesurer la quantité d'eau absorbée par les éprouvettes au fil du temps. Cette information est cruciale pour évaluer la capacité d'absorption du matériau et sa réaction face à l'humidité.



Figure 2.17 : Absorption d'eau par capillarité

2.6.2.3. Caractérisation macroscopique de la poudre de bois (MO) à moyen grandissement

Ce test est effectué sur la poudre de bois afin de déterminer la morphologie de la poudre et son état de surface fibreux



Figure 2.18 : macroscopique optique (OPTIKA)

2.6.2.2. Caractérisation microscopique du composite par (MEB)

Pour étudier l'adhésion entre les fibres de bois et la matrice polymère, nous avons utilisé le microscope électronique à balayage (MEB) de marque NeoScope, modèle JCM5000, équipé d'un détecteur d'électrons secondaires. Le principe du MEB est basé sur l'interaction électrons-matière. Un faisceau d'électrons primaires est dirigé vers l'échantillon dans un vide secondaire ; ensuite, les signaux émis par l'échantillon créent l'image observée. On utilise essentiellement deux principes physiques pour créer des images :

- L'émission d'électrons secondaires : un atome est bombardé par des électrons.
- La rétrodiffusion des électrons interagissant avec des atomes.

Puisque les CBP possèdent une faible conductivité électrique, il est nécessaire de métalliser les échantillons avant leur observation par le MEB. Pour ce faire, les échantillons ont été fracturés dans l'azote liquide, puis une couche d'argent a été déposée sur leur surface. Cette métallisation permet d'assurer une meilleure conductivité électrique des échantillons, ce qui facilite l'obtention d'images de haute qualité avec le MEB. Ainsi, nous avons pu étudier en détail l'interface entre les fibres de bois et la matrice polymère et évaluer l'adhésion entre ces deux composants du composite.



Figure 2.19 : Microscope électronique à balayage (MEB)

CHAPITRE 03
RÉSULTATS
ET
DISCUSSIONS

3. Résultats et Discussion

3.1. Essai de traction

1.1 Produit composite PP/PB et PEHD/PB en fonction du taux de charge et de la granulométrie 400 μm

Tableau 07 : résultats de traction CBP de différents taux de PB de la granulométrie 400 μm entre PP et PEHD

Échantillon	contrainte (σ_R) (MPa)	Déformation (ϵ)%	MOE (MPa)	Échantillon	Contrainte (σ_R) (MPa)	Déformation (ϵ)%	MOE (MPa)
PP (vierge)	33.6	13	258.4	PEHD (vierge)	26.32	96	27.41
PP+40%PB	16.44	2	802	PEHD+40%PB	17.18	5	312.36
PP+50%PB	14.13	3	471	PEHD+50%PB	13.7	3	456
PP+60%PB	13.03	1.5	868.66	PEHD+60%PB	11.81	2.4	492.08

1.2. Produit composite PP/PB et PEHD/PB en fonction du taux de charge et de la granulométrie 500 μm

Tableau 08 : résultats de traction CBP de différents taux de PB de la granulométrie 500 μm entre PP et PEHD

Échantillon	contrainte (σ_R) (MPa)	Déformation (ϵ)%	MOE (MPa)	Échantillon	contrainte (σ_R) (MPa)	Déformation (ϵ)%	MOE (MPa)
PP (vierge)	33.6	13	258.4	PEHD (vierge)	26.32	96	27.41
PP+40%PB	21.28	8.5	250.35	PEHD+40%PB	16.8	8	210
PP+50%PB	14.4	2.9	496.55	PEHD+50%PB	10.32	4.1	251.7
PP+60%PB	13.98	2.6	537.7	PEHD+60%PB	11.18	2.7	414.07

A) Cas du contrainte composite PP/PB et PEHD/PB

Le tableau n°07 et n°08 présentent l'évolution des propriétés mécaniques suivantes : la contrainte à la rupture (σ_R), la déformation (ϵ %) et le module d'élasticité maximal (E) en fonction du taux de charge en poudre de bois.

On observe que la matrice polymérique PP et PEHD vierge ont montré une résistance à la rupture plus importante que celle du composite chargé en poudre de bois, pour les différentes teneurs en charge.

En même temps, les valeurs respectives de la contrainte à la rupture (σ_R) des composites ont montré une régression de 50% par rapport à celles du PP et PEHD vierge. Cette baisse de ténacité du composite peut être expliquée par deux facteurs :

a) Les conditions opératoires de malaxage de la charge et de la matrice, qui doivent normalement être réalisées dans une extrudeuse à double vis pour obtenir un malaxage optimal. Cependant, l'actuel composite a été mélangé dans une extrudeuse mono-vis en raison de l'indisponibilité d'une extrudeuse à double vis dans la zone où ce travail a été réalisé.

b) La diminution de la valeur de la contrainte à la rupture des composites chargés s'explique par une faible interaction interfaciale entre le polymère et la charge. Pour remédier à ce problème, il serait possible d'ajouter des agents de couplage, tels que des poly-silanes et des poly-titanates, qui pourraient améliorer considérablement l'interaction entre la poudre de bois filaire et le polymère polyoléfinique. Ces agents de couplage pourraient favoriser des interactions chimiques énergétiques élevées et ainsi améliorer la compatibilité entre le polymère et la charge.

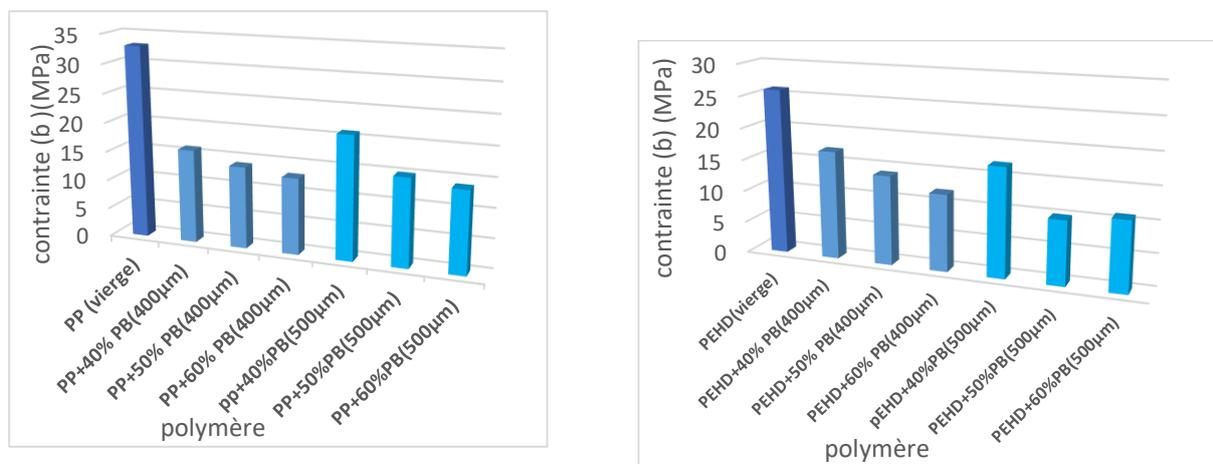


Figure 3.1 : Comparaison de la contrainte de traction **CBP** de différents taux de PB et de la granulométrie entre PEHD et PP

B) Cas de la déformation à la rupture du composite PP/PB et PEHD /PB

La matrice polymère en PP vierge affiche une déformation à la rupture de 13%. Cela peut être attribué à la rigidité, au grade et à la structure macromoléculaire du polymère. En revanche, le composite PP bois montre une déformation variant entre 1.5 % et 3% pour la granulométrie de 400 µm et entre 2% et 8% pour la granulométrie de 500 µm, respectivement en fonction du taux de charge incorporé.

Quant à la matrice polymère en PEHD vierge, elle affiche une déformation à la rupture de 96%. En comparaison, le composite PEHD/PB montre une déformation variant entre 2.4% et 8% pour les granulométries de 400 et 500 μm , respectivement en fonction du taux de charge incorporé. Bien que ce faible taux de déformation n'ait pas d'incidence significative sur l'opérabilité du matériau composite, il ne correspond pas aux attentes en termes de déformation, compte tenu de la qualité de la charge incorporée.

Pour améliorer cet aspect, il serait judicieux d'intensifier l'utilisation de produits de traitement de surface afin de renforcer l'adhésion entre le polymère et la charge. L'effet de dilution induit par la charge devrait normalement augmenter significativement la plage d'allongement du composite. Cependant, la charge partiellement traitée en surface par l'agent de dispersion (acide stéarique) n'a pas montré d'effet notable sur la modification de l'énergie d'adhésion polymère-charge. Il serait donc conseillé d'augmenter le taux de recouvrement de la surface de la charge pour combler ce déficit en déformation du matériau.

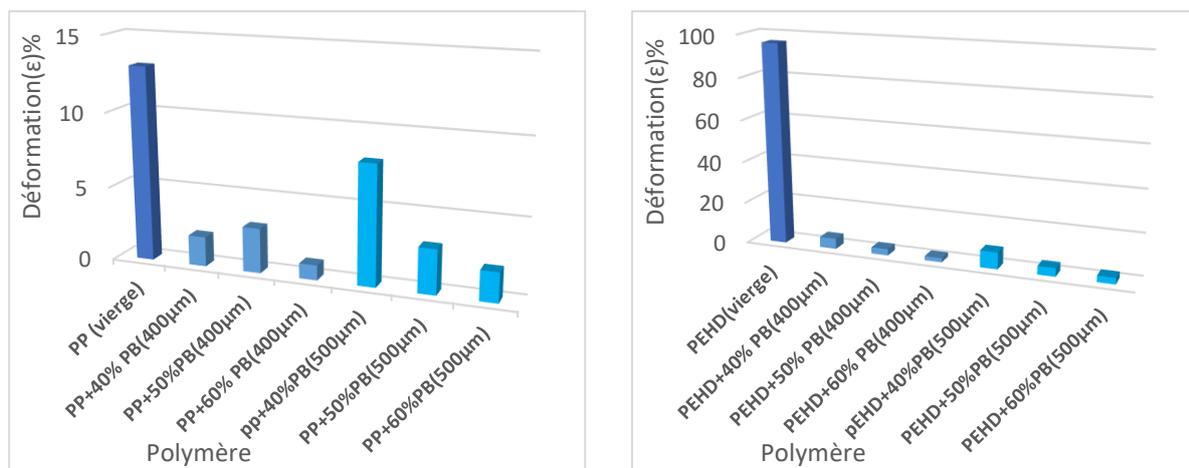


Figure 3.2 : Comparaison de la déformation de traction **CBP** de différents taux de PB et de la granulométrie entre PEHD et PP

C) Cas du module d'élasticité du composite PP/PB et PEHD/PB

Les résultats obtenus pour les modules d'élasticité montrent une augmentation significative pour les échantillons chargés, comparativement aux résultats de la matrice vierge PP et PEHD. Il est important de noter que les valeurs du module d'élasticité peuvent être scindées en deux variantes : le module à la limite de l'élasticité et le module d'élasticité à la rupture. Dans notre étude, nous avons été contraints d'utiliser une seule valeur maximale affichée numériquement par le calculateur de la machine.

Le module d'élasticité étant proportionnel à la contrainte de traction à la rupture et au taux de déformation du matériau, nous avons observé une exception pour les échantillons avec un taux de charge de 50%, qui affiche une valeur de 471 MPa. Cependant, les valeurs du module sont doublées pour les taux de charge de 40% et 60%.

La matrice vierge PP présente un module d'élasticité deux fois moins prononcé que celui des échantillons chargés, en raison d'un taux de déformation important de 80% pour le PP, en comparaison avec les échantillons chargés en PB à différentes teneurs et avec une granulométrie de 400 μm .

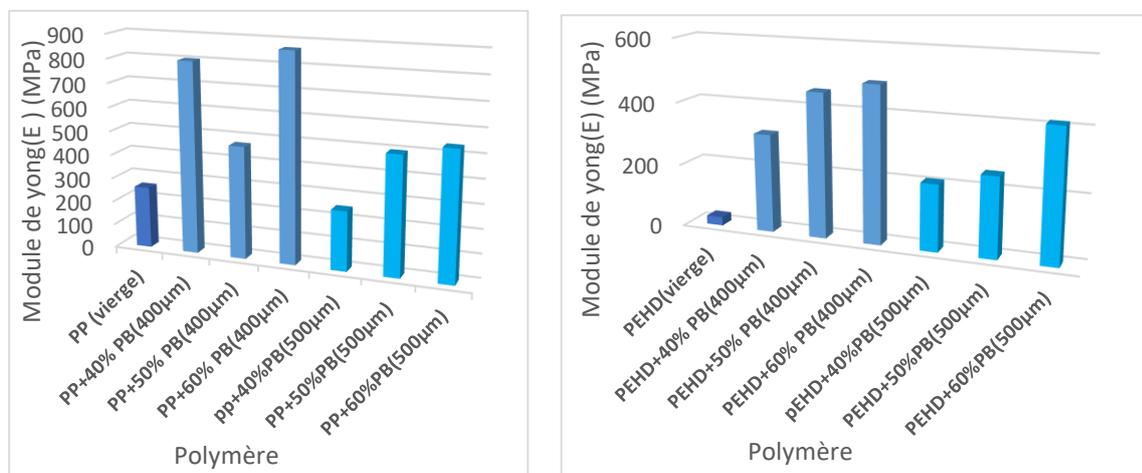


Figure 3.3 : Comparaison de module d'élasticité de traction CBP de différents taux de PB et de la granulométrie entre PEHD et PP

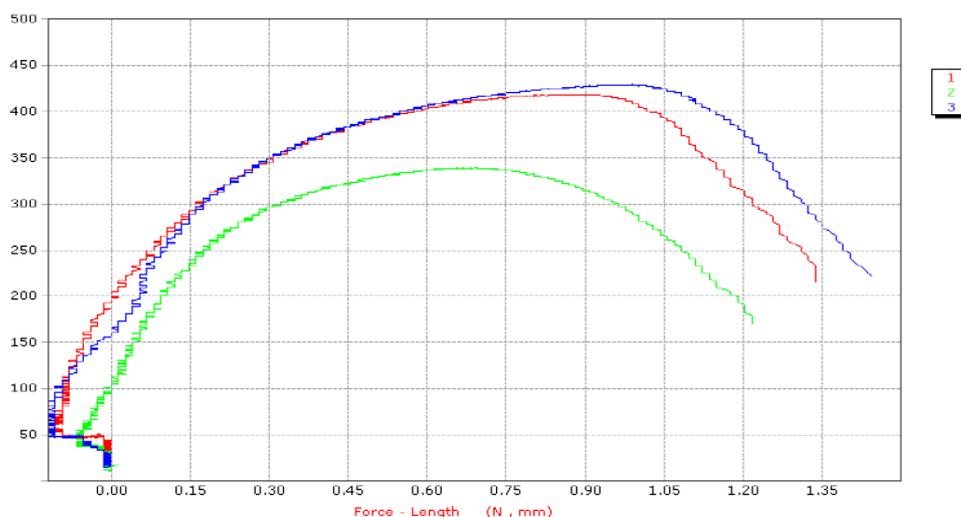


Figure 3.4 : courbe d'essai de flexion de CPB en fonction du taux de charge et de la granulométrie

3.2. Essai de flexion

2.1 Produit composite PP/PB et PEHD/PB en fonction du taux de charge et de la granulométrie 400 μm

Tableau 09 : résultats de flexion CBP de différents taux de PB de la granulométrie 400 μm entre PP et PEHD

Échantillon	contrainte (σ_R) (MPa)	Déformation (ϵ)%	MOE (MPa)	Échantillon	contrainte (σ_R) (MPa)	Déformation (ϵ)%	MOE (MPa)
PP (vierge)	93.71	22	425.96	PEHD (vierge)	165.02	71	232.42
PP+40%PB	51.19	8	639.87	PEHD+40%PB	44	13	338.46
PP+50%PB	45.86	10.5	458.6	PEHD+50%PB	32.64	6.3	515.23
PP+60%PB	40.49	6.4	632.2	PEHD+60%PB	34.64	6.3	549.36

2.2. Produit composite PP/PB et PEHD/PB en fonction du taux de charge et de la granulométrie 500 μm :

Tableau 10 : résultats de flexion CBP de différents taux de PB de la granulométrie 500 μm entre PP et PEHD

Échantillon	contrainte (σ_R) (MPa)	Déformation (ϵ)%	MOE (MPa)	Échantillon	contrainte (σ_R) (MPa)	Déformation (ϵ)%	MOE (MPa)
PP (vierge)	93.71	22	425.96	PEHD (vierge)	165.02	71	232.42
PP+40%PB	32.03	4	565.78	PEHD+40%PB	44.54	12	371.16
PP+50%PB	44.10	5.7	773.68	PEHD+50%PB	24.9	6.3	395.24
PP+60%PB	40.57	7	579.55	PEHD+60%PB	35.62	9.1	391.43

2.1.1. Cas du contrainte composite PP/PB et PEHD/PB

Les résultats d'essais de flexion dans les tableaux n°09 et n°10 montrent une allure similaire à celle des propriétés précédentes. On peut donc conclure que le matériau testé possède un comportement de composite, où les échantillons chargés montrent une valeur plus importante que les échantillons non chargés

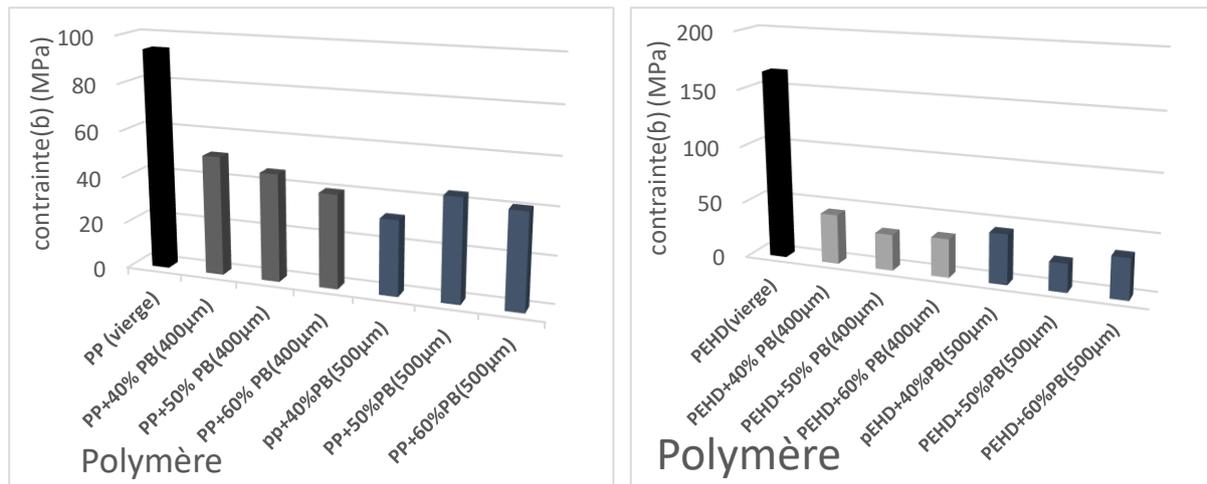


Figure 3.5 : Comparaison de la contrainte de flexion **CBP** de différents taux de PB et de la granulométrie entre PEHD et PP

2.1.2) Cas de la déformation à la rupture du composite PP/PB et PEHD /PB

Le taux de déformation de la matrice vierge PP est supérieur à celui des matériaux chargés. Ceci s'explique par les faibles forces de cohésion et d'adhésion à l'interface matrice/bois en premier lieu, ainsi que par l'homogénéité particulière de la charge au sein de la matrice polymère.

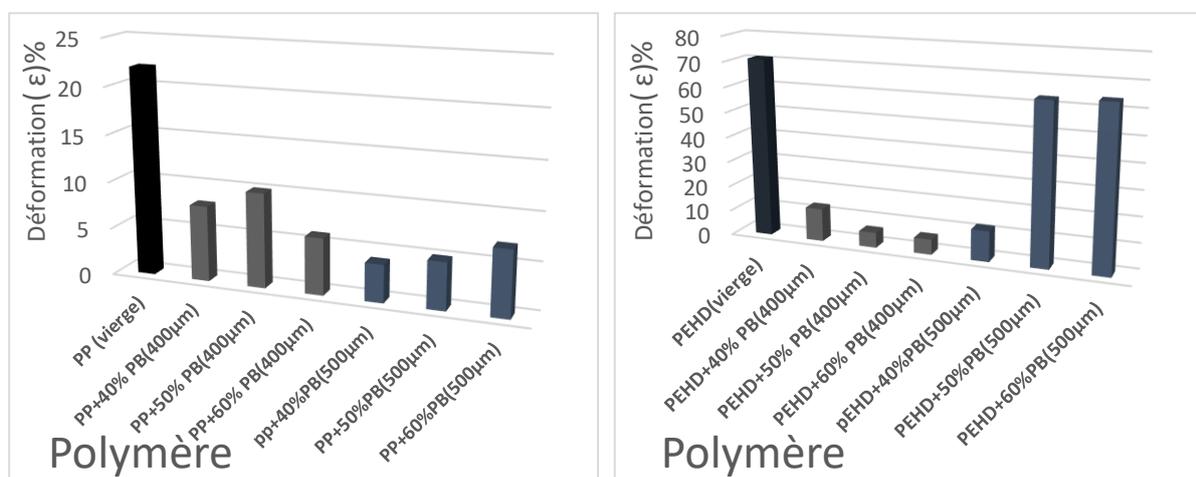


Figure 3.6 : Comparaison de la déformation de flexion **CBP** de différents taux de PB et de la granulométrie entre PEHD et PP

2.1.3) Cas du module d'élasticité du composite PP/PB et PEHD/PB

Le module d'élasticité en flexion montre une valeur inférieure dans la matrice vierge par rapport au matériau chargé. Ceci peut être expliqué par une plus grande déformation de la matrice vierge. Bien que l'allure générale constatée sur les paramètres de flexion (contrainte,

déformation, module d'élasticité) soit presque semblable pour les deux matrices PP et PEHD, on constate quelques divergences dans ces paramètres pour les échantillons chargés en PP et PEHD. Par exemple, la contrainte en flexion est plus intense pour les matériaux en PP que pour ceux en PEHD, contrairement à la déformation où l'on observe des valeurs plus grandes pour les matériaux en PEHD que pour ceux en PP.

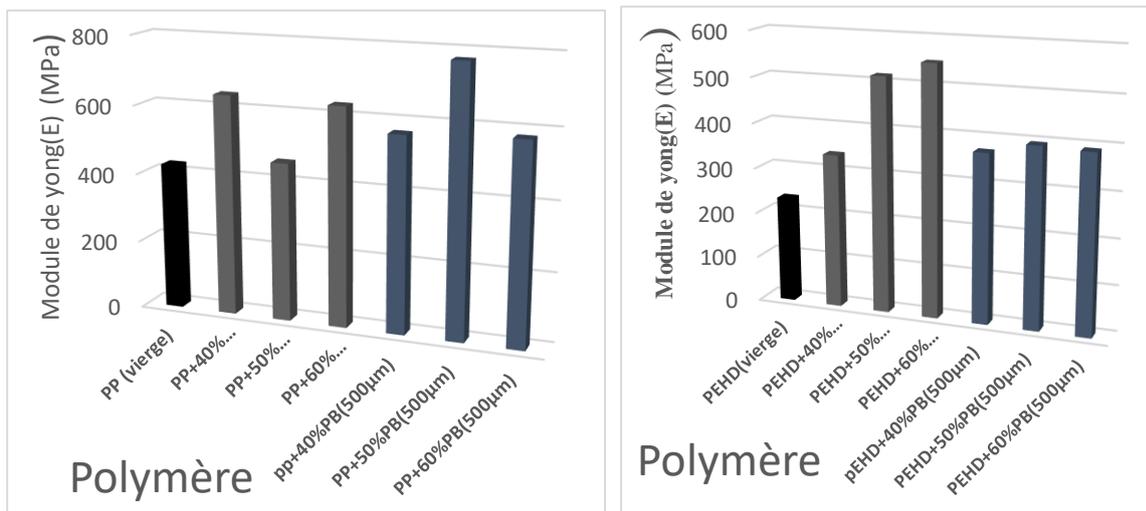


Figure 3.7 : Comparaison de module d'élasticité de flexion CBP de différents taux de PB et de la granulométrie entre PEHD et PP

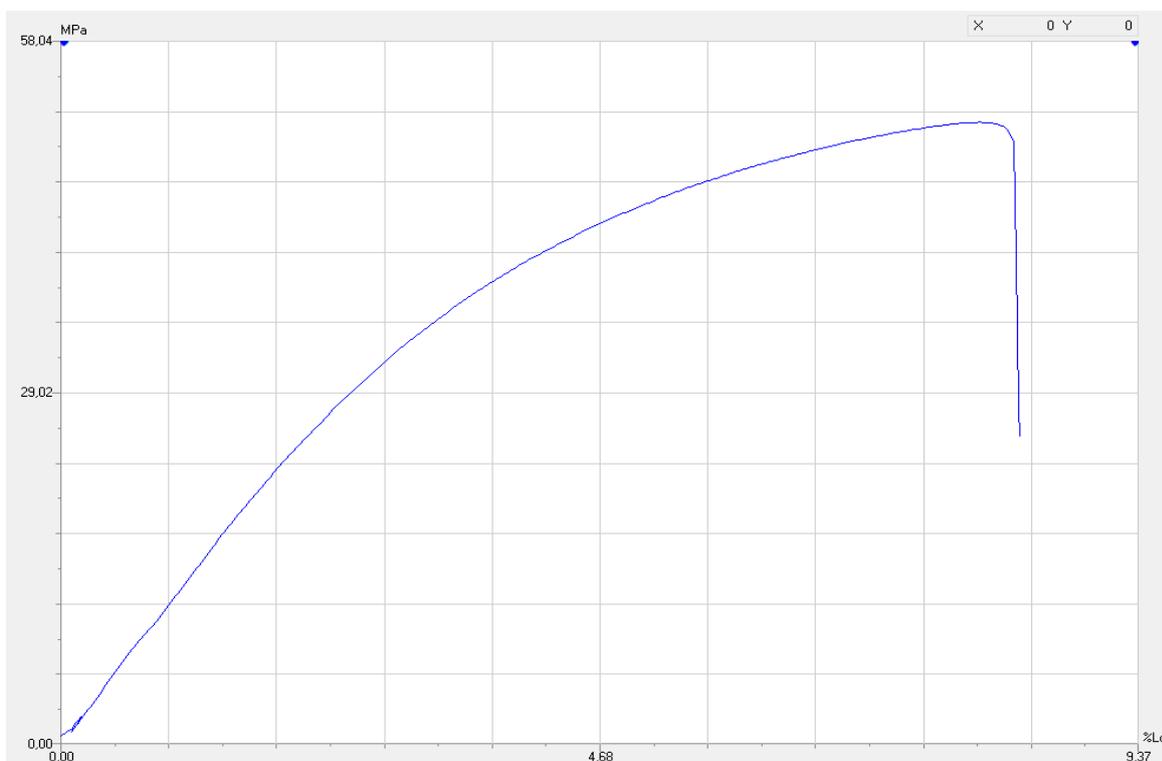


Figure 3.8 : courbe d'essai de flexion du CPB en fonction du taux de charge et de la granulométrie

3.3. Test d'impact choc

3.3.1. Produit composite PP/PB et PEHD/PB en fonction du taux de charge et de la granulométrie 400 μm

Tableau 11 : résultats de choc CBP de différents taux de PB de la granulométrie 400 μm entre PP et PEHD

Échantillon	Résistance au choc α_{iU} (kJ/m ²)
PP (vierge)	11.75
PP+40 % PB	12.50
PP+50% PB	12
PP+60% PB	13

Échantillon	Résistance au choc α_{iU} (kJ/m ²)
PEHD (vierge)	53.25
PEHD+40 % PB	18.75
PEHD+50% PB	15
PEHD+60% PB	15.5

3.2. Produit composite PP/PB et PEHD/PB en fonction du taux de charge et de la granulométrie 500 μm :

Tableau 12 : résultats de choc CBP de différents taux de PB de la granulométrie 500 μm entre PP et PEHD

Échantillon	Résistance au choc α_{iU} (kJ/m ²)
PP (vierge)	11.75
PP+40 % PB	12.75
PP+50% PB	12.25
PP+60% PB	12.56

Échantillon	Résistance au choc α_{iU} (kJ/m ²)
PEHD (vierge)	53.25
PEHD+40% PB	17.5
PEHD+50% PB	15.75
PEHD+60% PB	14.75

Le test de choc montre des valeurs importantes pour le PEHD vierge, soit 53.25 kJ/m². En revanche, les autres échantillons chargés montrent un recul d'environ 60 % par rapport à la matrice vierge. Cette même constatation est faite pour les autres échantillons avec des taux de charge de 50 % et 60 %. En conclusion, la propriété mécanique liée au comportement au choc du matériau mérite notre attention pour modifier certains paramètres, tels que le traitement de surface de la charge d'une part, et le choix des bonnes conditions de mise en œuvre ou de transformation des mélanges primaires en vue de préparer les échantillons destinés aux tests mécaniques et autres.

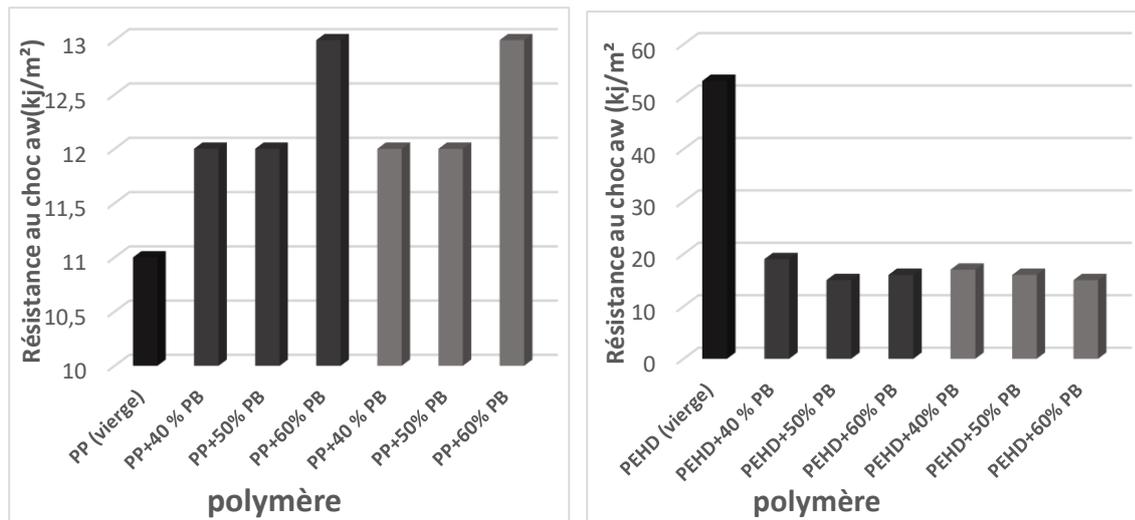


Figure 3.9 : Comparaison la résistance au choc de CBP de différents taux de fibres et de la granulométrie entre PEHD et PP

Remarque

Selon les résultats présentés dans les essais mécaniques, nous ne concluons que le composite est moins rigide. Cela est dû à sa faible résistance à la force de contrainte qui lui est appliquée. Ainsi, plus le matériau composite est rigide, plus il est capable de supporter la force de contrainte qui lui est appliquée.

4. Absorption d'eau

4.1 Produit composite PP/PB et PEHD/PB en fonction du taux de charge et de la granulométrie 400 et 500 μm :

Tableau 13 : coefficient d'absorption d'eau par capillarité, de PP/PB de différents taux de PB et de la granulométrie

ech	Cw,s: coefficient d'absorption d'eau par capillarité, en $\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{h}^{1/2}$						
	0h	0.5h	1h	2h	3h	4h	24h
PP (vierge)	0	0.62	0.55	0.48	0.41	0.36	0.17
PP+40% PB(400 μm)	0	0.49	0.60	0.50	0.47	0.41	0.21
PP+50% PB(400 μm)	0	0.53	0.77	0.58	0.50	0.44	0.26
PP+60% PB(400 μm)	0	0.62	0.66	0.54	0.48	0.42	0.37
pp+40% PB(500 μm)	0	0.077	0.33	0.27	0.25	0.22	0.122
PP+50% PB(500 μm)	0	0.12	0.72	0.58	0.48	0.44	0.27
PP+60% PB(500 μm)	0	0.12	0.38	0.31	0.31	0.27	0.36

Tableau 14 : coefficient d'absorption d'eau par capillarité, de PEHD/PB de différents taux de PB et de la granulométrie

ech	Cw,s: coefficient d'absorption d'eau par capillarité, en $\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{h}^{1/2}$					
	0h	0.5h	1h	2h	3h	4h
PEHD(vierge)	0	0.46	0.66	0.50	0.41	0.38
PEHD+40% PB(400 μm)	0	0.22	0.33	0.34	0.31	0.27
PEHD+50% PB(400 μm)	0	0.31	0.55	0.42	0.34	0.3
PEHD+60% PB(400 μm)	0	0.38	0.55	0.50	0.41	0.38
pEHD+40% PB(500 μm)	0	0.38	0.72	0.50	0.44	0.38
PEHD+50% PB(500 μm)	0	0.15	0.44	0.32	0.31	0.27

L'analyse des résultats de l'absorption d'eau nous conduit au constat et remarqué suivant

1. un comparaison entre deux matrice vierge PP et PEHD les résultats au montre que le PEHD plus absorbent a PP (vue la structure semi cristalline de PEHD alors que le pp et quasi totalement amorphe)

2. l'analyse des résultats d absorptions des éprouvettes charge montre que l'absorption augment avec le taux de la charge

3. analyse des résultats d absorptions de différent éprouvettes chargées dans différent matrice montre que la absorption augment dans la matrice pp plus que dans la matrice PEHD

Le comportement de PEHD et mieux considère ce lieu de pp

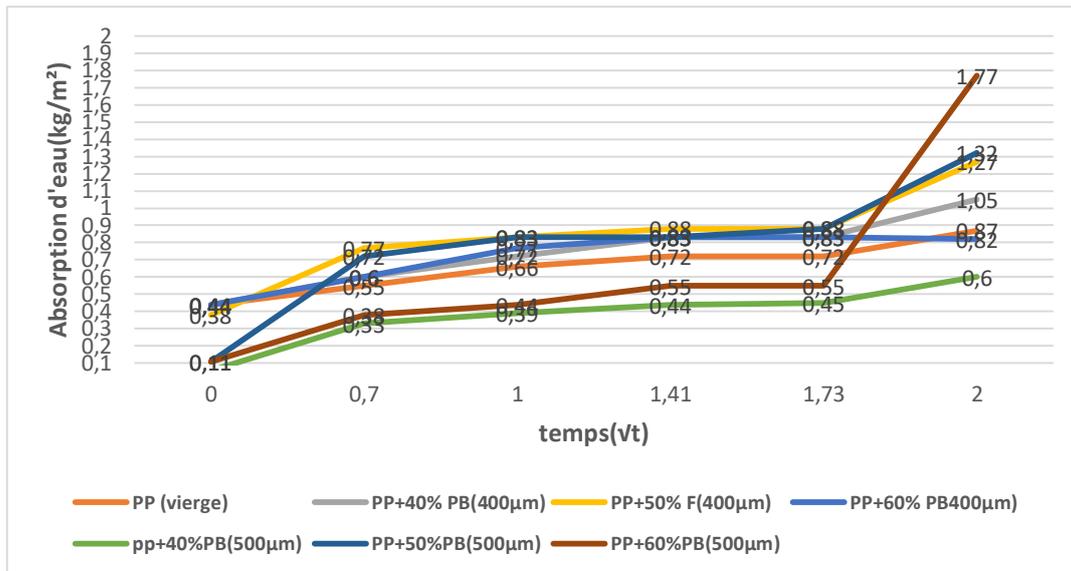


Figure 3.10 : l'Absorption d'eau de matrice PP/PB de différents taux de PB et de la granulométrie

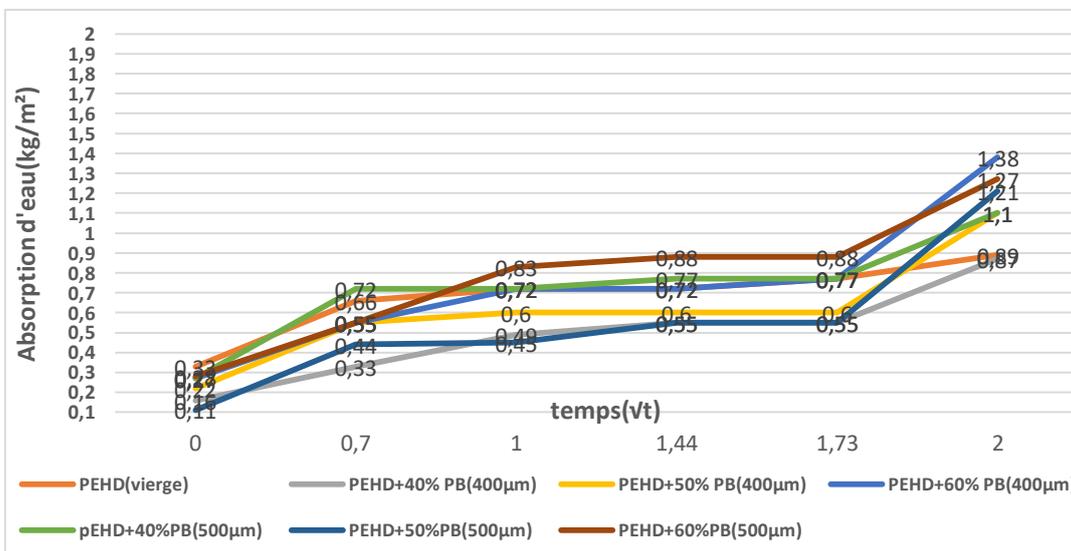


Figure 3.11 : l'Absorption d'eau de matrice PEHD/PB de différents taux de PB et de la granulométrie

3.4. Caractérisation des propriétés de la surface

3.5. -Caractérisation macroscopique de la poudre de bois (MO) à moyen grandissement,

La première conclusion que l'on peut tirer à partir des photos des charges de 400 et 500 μm est la forme des particules. Les particules observées au microscope optique du laboratoire SNV UNIV -BBA montrent une forme parallélépipédique ou rectangulaire désordonnée. Cette forme observée peut être attribuée au type de broyeur utilisé pour découper les sciures de bois, qui est un broyeur à lame. Ces observations confirment les images obtenues et examinées par microscopie optique.

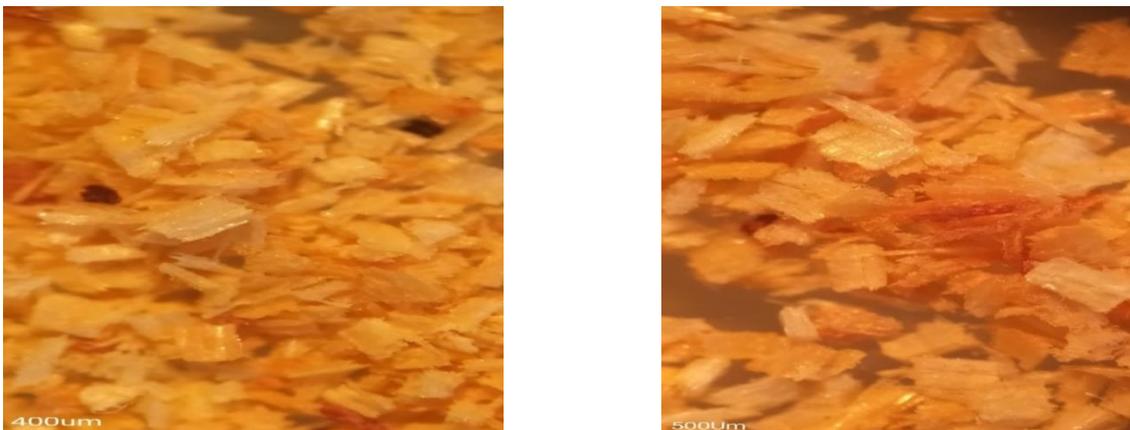


Figure 3.12 : Image macroscopique de la poudre de bois (MO) à moyen grandissement

1. Caractérisation microscopique du composite par (MEB)

La caractérisation microscopique par MEB a été effectuée sur les échantillons des composites PP/PB soumis aux tests de traction et de choc Charpy. Cette caractérisation a permis de visualiser l'état de surface des échantillons suivants :

1.1-Composite PEHD/PB de granulométrie 400 μm , avec 40 % taux de charge, en traction,

La photo montre l'interface de rupture de l'échantillon composite, et on peut clairement observer un détachement ou glissement franc entre le polymère et la charge. La morphologie des grains de la charge, qui sont fibreux ou présentent une surface poilue, a un impact sur l'interface et la profondeur du lieu de détachement entre le polymère et la charge. Nous concluons en effet qu'il n'y a pas suffisamment de cohésion intra-macromolécule-charge. En

d'autres termes, l'adhésion entraînée par le traitement de surface n'a pas eu d'effet significatif sur l'amélioration de l'interface entre le polymère et la charge.

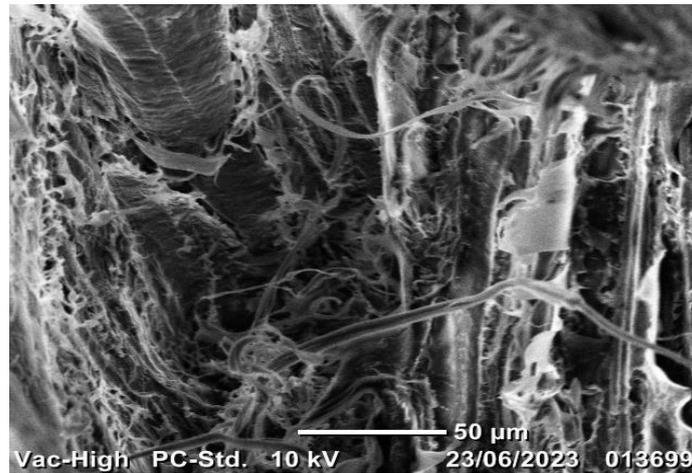


Figure 3.13 : Image de microscopie électronique à balayage (MEB) du (PEHD ;
40% poudre de bois 400 μm) en traction

1.2-Composite PEHD/PB de granulométrie 500 μm avec 40 % taux de charge, en traction,

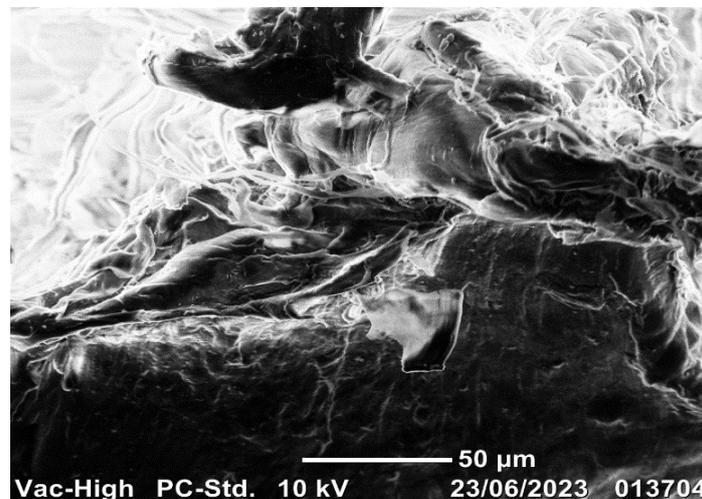


Figure 3.14 : Image de microscopie électronique à balayage (MEB) du (PEHD ;
40% poudre de bois 500 μm) en traction

La photo montre clairement une corrélation entre les résultats de traction (module et contrainte) et l'image MEB. On peut observer que la zone de rupture du composite se fait à l'interface entre la charge et le polymère, particulièrement lorsque la granulométrie est de 500 μm . Cela nous permet de constater l'action du recouvrement de la charge par la résine PEHD. Cependant, ce recouvrement résine/charge n'a pas eu un effet significatif sur l'adhésion des macromolécules sur le périmètre de la charge.

Ainsi, il serait nécessaire d'introduire des agents de couplage pour augmenter de manière significative les propriétés exigées des composites. Les mêmes observations ont été faites pour les autres échantillons composites, y compris la matrice PP/PB, pour les autres caractéristiques mécaniques telles que le test de choc Charpy et la traction.

1.3-Composite PP/PB de granulométrie 400 μm avec 40 % taux de charge, en traction,

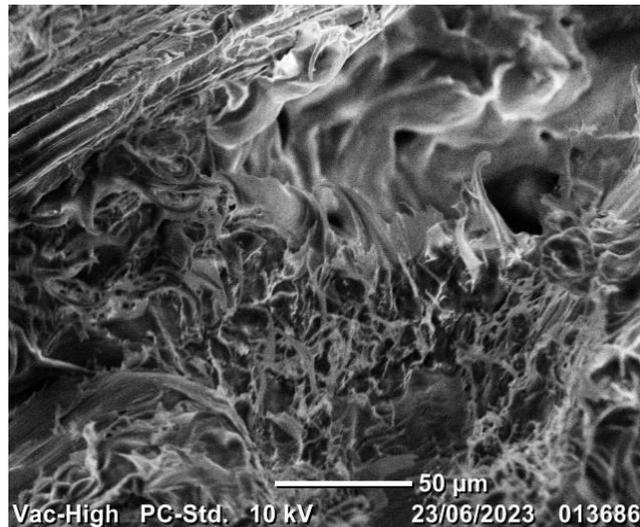


Figure 3.15 : Image de microscopie électronique à balayage (MEB) du (PP 40% poudre de bois 400 μm) en traction

1.4-Composite PP/PB de granulométrie 500 μm avec 40 % taux de charge, en traction,

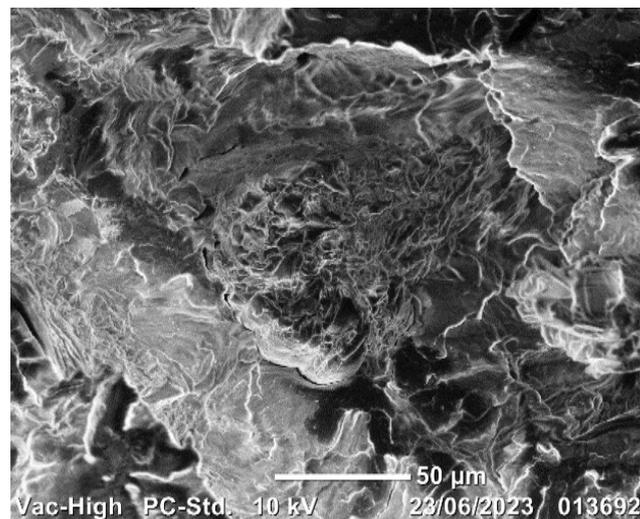


Figure 3.16 : Image de microscopie électronique à balayage (MEB) du (PP 40% poudre de bois 500 μm) en traction

1.5-Composite PEHD/PB de granulométrie 400 μm , avec 40 % taux de charge, en Choc Charpy,

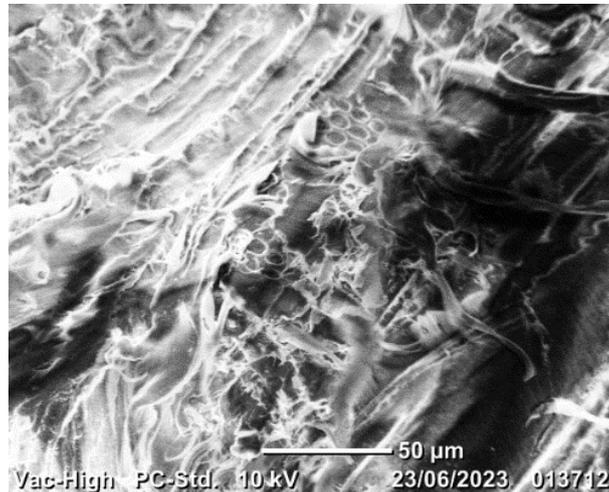


Figure 3.17 : Image de microscopie électronique à balayage (MEB) du (PEHD 40% poudre de bois 400 μm) en Choc Charpy,

1.6-Composite PEHD/PB de granulométrie 500 μm , avec 40 % taux de charge, en Choc Charpy,

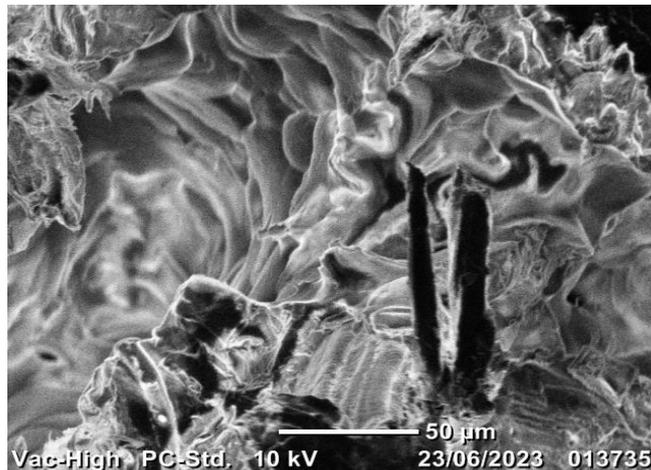


Figure 3.18 : Image de microscopie électronique à balayage (MEB) du (PEHD 40% poudre de bois 500 μm) en Choc Charpy,

2 .Caractérisation microscopique de la poudre de bois par (MEB)

Les observations réalisées sous MEB ont montré que l'état de surface de la charge traitée apparaît moins rugueux. Avant traitement, la surface de la charge présentait des aspérités et

un aspect velouté désordonné. Cependant, après traitement par le produit de dispersion, acide stéarique (SA), la surface des particules de bois traitées présente un aspect poli. Ces observations sont visibles sur les photos des deux charges prises à un grandissement de 50 μm .

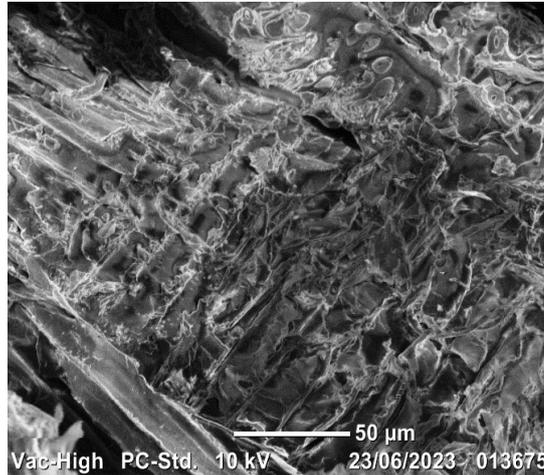


Figure 3.19 : Image de microscopie électronique à balayage (MEB) du PB avec traitement

CONCLUSION

ET

RÈCOMMANDATIONS

CONCLUSION GÉNÉRALE

L'étude menée sur l'élaboration et la caractérisation des matériaux composites innovants a révélé de nombreux avantages et bénéfiques techniques. L'utilisation de déchets de bois comme charge renforçante rend ces matériaux écologiques et économiques, ce qui les rend attrayants pour les fabricants en tant qu'alternatives incontournables. De plus, les propriétés consolidées de ces matériaux en font des candidats prometteurs pour diverses applications.

La caractérisation de la matière première, la sciure de bois, a été l'objectif principal de ce travail. La sciure a été traitée en surface et sa morphologie a été observée au microscope. Sa masse volumique apparente a été déterminée à 0.209 g/ml, et son taux de compression a été évalué à 35%.

Pour les matériaux composites, deux coupes granulométriques ont été choisies pour la poudre de bois : 400 μm et 500 μm . Le choix de la matrice polymérique a été guidé par ses propriétés spécifiques : le PP pour sa résilience et rigidité, et le PEHD pour sa résistance à l'enfouissement et faible absorption d'eau.

Les résultats des essais mécaniques pour les composites PEHD/bois et PP/bois ont montré des propriétés consistantes en termes de contrainte, allongement et module d'élasticité. Cependant, des divergences ont été observées pour la propriété de choc Charpy, qui nécessite une étude approfondie.

L'absorption des composites a augmenté avec l'augmentation du taux de charge de bois, ce qui était attendu.

Les observations au microscope électronique à balayage ont révélé une adhésion insuffisante entre le polymère et la charge de bois dans les zones de rupture. L'utilisation d'agents de couplage peut améliorer cette adhésion et renforcer la cohésion de la poudre de bois et de la matrice polymérique.

En conclusion, les résultats obtenus dans cette étude ouvrent des perspectives intéressantes pour l'utilisation de ces matériaux composites innovants dans diverses applications industrielles, tout en mettant en évidence des pistes d'améliorations potentielles pour optimiser leurs performances mécaniques.

LES RECOMMANDATIONS

Pour parachever l'étude et améliorer les performances des matériaux composites sont les suivantes :

1. Étendre l'étude à d'autres polymères tels que le PVC, le polystyrène PS et les résines thermodurcissables pour évaluer leur compatibilité avec la poudre de bois et identifier de nouvelles possibilités d'applications.
2. Utiliser des agents de couplage pour traiter la poudre de bois afin d'améliorer l'adhésion et la cohésion entre la charge et la matrice polymérique, renforçant ainsi la consistance mécanique des panneaux composites.
3. Préparer les mélanges polymère/bois sur une extrudeuse à double vis pour obtenir un malaxage plus efficace et optimal de la charge dans la matrice, ce qui pourrait améliorer la dispersion des particules et l'homogénéité du matériau composite.
4. Déterminer la perméabilité de la poudre de bois à l'état comprimé et non comprimé pour évaluer son comportement en termes d'absorption d'eau et de perméabilité.
5. Introduire des agents ignifugeants comme additifs dans la masse polymère/bois pour améliorer la résistance au feu des matériaux composites.
6. Compléter la caractérisation des propriétés physicochimiques et mécaniques des matériaux composites afin d'obtenir une vue complète de leur comportement et de leurs performances.

En suivant ces recommandations, l'étude pourra être approfondie et permettra d'optimiser les propriétés des matériaux composites, ouvrant ainsi de nouvelles opportunités pour leur utilisation dans divers secteurs industriels.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

RÉFÉRENCES

- [1]. Bengtsson, M., Le Baillif, M., & Oksman, K. (2007). Extrusion and mechanical properties of highly filled cellulose fiber-polypropylene composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 38(8), 1922-1931.
- [2]. Dongfeng L. (2011). Wood-Polymer Composites. *Advanced in composite materials-analysis of natural and Man- Made Materials*. Dr. Pavla Tesinova (Ed.) INTECH Open Access Publisher. 230-284.
- [3]. Agassant, J.-F., Avenas, P., Sergent, J.-P., Vergnes, B. et Vincent, M. (1996). *La mise en forme des matières plastiques* (4e éd.) : Approche thermomécanique de la plasturgie. Technique & Documentation-Lavoisier, ISBN 2-7430-0016-3. 844 pp.
- [4]. Young Quist, J. A. (1999). Wood-based composites and panel products. *Wood Handbook: Wood as an Engineering Material*. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 463 pp.
- [5] : Kheireddin Kadri these de doctorat Étude numérique et expérimentale du démouillage de films polymères ultra-minces sous cisaillement
- [6] : Notion pratiques sur l'extrusion des thermoplastiques, syndicat national des extrudeurs de profiles plastiques, deuxième édition, 1993.
- [8] Boufkhed Hicham, « étude technologique et la maintenance préventive d'une presse à injection pet », mémoire présenté pour l'obtention du diplôme de master, département de génie mécanique, Bejaia 2016/2017.
- [7]. Silva, K. (2011). *Environmentally friendly packaging materials from renewable resources as alternatives for oil-based polymers*. Thèse de doctorat, Brunel University. 350 pp.
- [8]. Thèse de Magister étude expérimentale du comportement Mécanique des Polymères 'Houria LADJABI'.
- [9]. Crawford, R. J. et Keams, M. P. (2003). *Practical guide to rotational moulding*. Rapra Technology Limited, Queen's University, Belfast 174 P. Disponible en ligne:
<http://2active.ru/files/book/Practical%20Guide%20to%20Rotational%20Moulding%20Roy%20J.%20Crawford%20and%20Mark%20P.%20Keams%202003.pdf>
- [9]. Klyosov, A. A. (2007). *Wood-plastic composites*: John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey. 702 pp.
- [10]. Mark, J. E. et Erman, B. (2007). *Rubberlike elasticity: a molecular primer (2^d éd.)*: Cambridge University Press, New York. 272 pp.
- [11]. Karian, H. (2003). *Handbook of polypropylene and polypropylene composites* (2nd éd.), revised and expanded: CRC press. RheTech, Inc. Whitmore Lake, Michigan, USA, 669 pp.

- [12]. Zobel, B. (1981). *Wood quality from fast-grown plantations*. *Toppi*. North Carolina State university, School of Forest Resources, Raleigh. 64 (1).
- [13]. Jaouen, G. (2007). Etude des stratégies biomécaniques de croissance des jeunes arbres en peuplement hétérogène tropical humide. These, Université Henri Poincaré-Nancy 1: 218
- [14]. Y. T. Zheng, D. R. Cao, D. S. Wang, J. J Chen, Study on the interface modification of bagasse fiber and the mechanical properties of its composite with PVC, *Composites: Part A*, 38; 20-25, 2007.
- [15]. M. Bengtsson, K. Oksman, The use of silane technology in cross-linking polyethylene/wood flour composites, *Composites, Part A*, 37; 752-765, 2006.
- [16]. K. Panyasart, N. Chaiyut, T. Amornsakchai, O. Santawitee, Effect of surface treatment on the properties of pineapple leaf fibers reinforced polyamide 6 composites, *Energy Procedia*, 56; 406 – 413, 2014.
- [17]. C. Nah, C.K. Hong, I. Hwang, N. Kim, D.H. Parck, B.S. Hwang, Mechanical properties of silanized jute–polypropylene composites, *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 14; 71-76, 2004
- [18] Milosavljevic I., Suuberg E.M., Cellulose thermal decomposition kinetics: Global mass loss kinetics, *Ind. Eng. Chem. Res.* 35 (1995) 653–662
- [19]. I. Baroulaki, O. Karakasi, G. Pappa, P.A. Tarantili, D. Economides, K. Magoulas, Preparation and study of plastic compounds containing polyolefins and post used newspaper fibers, *Composites: Part A* , 37(10); 1613-1625, 2006.
- [20]. T.P. Thao Tran, J.C. Bénézet, A. Bergeret, Rice and Einkorn wheat husks reinforced poly (lactic acid) (PLA) bio composites: Effects of alkaline and silane surface treatments of husks, *Industrial Crops and Products*, 58; 111–124, 2014.
- [21]. P.A. Sreekumar, S.P. Thomas, J.M Saiter, J. Kuruvilla, G. Unnikrishnan, T. Sabu, Effect of fiber surface modification on the mechanical and water absorption characteristics of sisal/polyester composites fabricated by resin transfer molding, *Composites: Part A* , 40; 1777–1784, 2009.
- [22]: Kalia S.; Kaith B.S.; Kaura I. (2009), Pretreatments of Natural Fibers and their Application as Reinforcing Material in Polymer Composites – A Review. *Polymer Engineering and Science*, 49, 1253-1272.
- [23]. George, S. P., et al. (2001). "A novel thermostable xylanase from *Thermomonospora* sp.: influence of additives on thermostability." [24] *Bioresource Technology* 78(3): 221-224.
- [24] Georgopoulos, S. T., et al. (2005). "Thermoplastic polymers reinforced with fibrous agricultural residues." *Polymer Degradation and Stability* 90(2): 303-312.
- [25] Lu, J. Z., et al. (2007). "Chemical coupling in wood fiber and polymer composites: a review of coupling agents and treatments." *Wood and fiber science* 32(1): 88- 104.
- [26]. Li, H., Liu, X., Legros, R., Bi, X. T., Lim, C. et Sokhansanj, S. (2012). Torrefaction of sawdust in a fluidized bed reactor. *Bioresource technology*, 103 (1), 453-458.

- [27].Tazi, M. (2015). Valorisation des sciures de bois dans des composites thermoplastiques (HDPE-BOIS) : élaboration, caractérisation et modélisation en soufflage libre, Thèse de doctorat. Université du Québec à Chicoutimi. 138 pages.
- [28].Carlbon, K. et Matuana, L. M. (2006). Functionalization of wood particles through a reactive extrusion process. *Journal of applied polymer science*, 101 (5), 3131- 3142.
- [29] S. Kenouche, “Physico-chimie des surfaces et catalyse hétérogène,” p. 93, 2016.
- [30] F. SUN, Lian-Ming and Meunier, “Adsorption. aspects théoriques,” *Techniques de l'ingénieur. Génie des procédés*, pp. J2730–1, 2003.
- [31]. AMEN, adsorption-définitions et explications, Thechno-Science.net.
- [32].BASILICO C., 1988. Le séchage haute température : vite n'est pas ennemi de bien. Le bois national, 17-24 Décembre.
- [33].GONET B., 1987. Holztechnol., 28-2,89-93.
- [34]. Thèse de doctorat POTENTIEL DES FIBRES DE BOIS TORRÉFIÉES POUR LA FABRICATION DE COMPOSITES BOIS-POLYMÈRE (RAMZIAYADI FÉVRIER 2018)
- [35]. Thèse de doctorat EFFET DU TRAITEMENT THERMIQUE DES FIBRES SUR LES PROPRIÉTÉS DES COMPOSITES BOIS-POLYMÈRE (mokhlis ben ali Mars 2016)
- [36]T. Kallel, *Etude des mélanges PE/PS contribution au recyclage*, Thèse de doctorat, Institut national des sciences appliquées, Lyon, 2003.
- [37] « notre planete.info, » [En ligne].
Available: www.notreplanete.info/environnement/definition_recyclage_dechets. [Accès le 07 06 2015].
- [38] R. Maurice, *Les plastiques dans l'emballage : polymères, technologie de mise en forme, recyclage*, Ed. Hermès, Paris, p.185, 1991...
- [38] R. Maurice, *Les plastiques dans l'emballage : polymères, technologie de mise en forme, recyclage*, Ed. Hermès, Paris, p.185, 1991.
- [39] U. S Environment Protection Agency (EPA), *Municipal solid waste generation, recycling, and disposal in the U.S.A*, Facts and Figures for 2008, Washington, 2009.
- [40]B. Selinger, *Chemistry in the Marketplace*, 3e Ed. Harcourt Brace Jovanovich, 1986.
- B. Selinger, *Chemistry in the Marketplace*, 3e Ed. Harcourt Brace Jovanovich, 1986.
- [41]J. Bourgois, B. Debrey, V. Laforest, *Traitements chimiques et physico-chimiques des déchets*, Les techniques de l'Ingénieur Vol.G, article 2070, 2000
- [42]<https://www.sorevo.com/fr/process/bois>