



Mémoire de fin d'études

PRESENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLOME DE : Master

Filière : Chimie
Option : Chimie de matériaux

THÈME :

**LES COMPOSITES HYBRIDES A FIBRES
VEGETALES**

Préparé par : ZOUAOUI Moncef
LARGUET Aissa

Soutenu le : 15/09/2021

Devant le jury :

Président	: BOUABDALLAH Mounira	MCB,	Université B.B.A
Encadreur	: HAMMA Amel	MCB,	Université B.B.A
Examineur	: BOUDJEMAA Sofiane	MCA,	Université B.B.A

Année Universitaire 2020-2021

REMERCIEMENTS

Nos vifs remerciements à M^{me} HAMMA Amel pour son aide, sa patience et ses encouragements qu'elle n'a cessé de nous communiquer.

Nous tenons particulièrement à remercier :

➤ *Tous les enseignants de la Faculté des Sciences et de Technologie, en particulier ceux qui ont contribué à notre formation Master chimie des Matériaux, pour leurs efforts, leurs directives et précieux conseils durant toute notre formation.*

Nos remerciements les plus vifs sont adressés au:

➤ *Dr BOUABDALLAH MOUNIRA, pour avoir accepté de présider le jury.*

➤ *Dr BOUDJEMAA, pour avoir accepté de juger ce travail.*

A vous tous, nous reformulons, nos remerciements les plus vifs, et nous vous dédions aussi ce modeste travail.

Merci à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail

DÉDICACES

Avant toutes choses, je remercie Dieu, le tout puissant, pour m'avoir donné la force et la patience pour mener à terme ce modeste travail.

Un hommage :

*À ma défunte grand-mère **ranjia** qui a pris soin de moi et a fait de moi un homme et m'a appris une partie de sa sagesse que je garderai toute ma vie, elle fut une source constante d'inspiration dans ma vie.*

*À mon défunt père **Mourad** qui est parti sans avoir la chance de le rencontrer.*

J'aurais tant aimé que vous soyez présents. Que Dieu ait vos âmes dans sa sainte miséricorde.

À mon grand-père abdekrime, école de mon enfance, qui a été mon ombre durant toutes les années des études et qui a veillé tout au long de ma vie, à m'encourager, à m'aider et à me protéger.

À toute ma famille, proche ou éloignée.

À MES AMIS DE TOUJOURS : Issam, Hatem, Islem, Wassim, Youcef Souhaib, Islem, Mohamed, Raouf, Rida, Bilal. En souvenir de notre sincère et profonde amitié et les moments agréables que nous avons passés ensemble, veuillez trouver dans ce travail l'expression de mon respect le plus profond et mon affection la plus sincère.

À TOUTES LES PERSONNES QUI ONT PARTICIPÉ À L'ÉLABORATION DE CE TRAVAIL ET À TOUS CEUX QUE J'AI OMIS DE CITER.

À tous ceux qui me sont chers, à ceux qui m'aiment et à tous ceux que j'aime.

MONCEF

DÉDICACES

Je dédie ce travail À ma mère qui m'a soutenu et m'a encouragé durant ces années d'études et qui n'a jamais cessé de me donner de son amour pur et de son unique et tendre inspiration.

Qu'elle trouve ici un témoignage de ma profonde reconnaissance.

À mon très cher père pour tous ses sacrifices et ses efforts afin de voir sa famille heureuse, pour notre réussite et pour nous avoir éclairé le chemin par ses conseils judicieux. Merci à vous d'être toujours présent pour réaliser mon bonheur.

À ma sœur Asma et mes frères Djamel, Aymen et Abderrahim qui ont partagé avec moi tous les moments d'émotions lors de la réalisation de ce travail, qui m'ont encouragé et supporté tout au long de mon parcours.

À mes chers amis Mustapha, Issam, Anis, Mohamed, Nassim, Sami, Kheiro, Salmani, Mahdi, Reda, Fares, Ali, Melouki, Amer, Hakim, Reda, Ahmed, Sami et Yahia et à tous mes amis en témoignage des liens solides et fraternels qui nous unissent, de leur soutien et leurs encouragements.

À tous ceux que j'aime et qui m'aiment.

RÉSUMÉ

Une recherche bibliographique a été réalisée sur les composites hybrides à matrice polymère renforcé par deux renforts dont l'un est d'origine végétale.

Une évaluation des propriétés mécaniques en traction, en flexion et au choc, ainsi que la résistance à l'absorption d'eau, la stabilité thermique, les propriétés d'amortissement ainsi que la durabilité de certains composites hybrides ont été recueillis de la littérature.

Les résultats ont montré que l'hybridation avec des fibres inorganiques améliore à la fois les propriétés mécaniques des composites et leur stabilité thermique. L'hybridation a amélioré la résistance à l'absorption d'eau de tous les systèmes composites et certains après vieillissement hydrothermique. Les fibres végétales réduisent le prix du matériau plus que les fibres synthétiques. Par contre, les fibres synthétiques prolongent la durée de vie des composites hybrides. L'hybridation a permis d'établir un équilibre entre les performances mécaniques et le coût de revient, tout en veillant à l'aspect respectueux de l'environnement du composite.

De meilleures performances sont aussi obtenues pour les composites hybrides structurés dépendamment de l'orientation, la longueur et le taux des fibres ainsi que l'empilement et l'architecture des renforts.

ABSTRACT

Bibliographic research has been carried out on hybrid composites with polymer matrix reinforced by two reinforcements, one is from vegetable origin.

An assessment of the mechanical properties in tensile strength, bending and impact, as well as the resistance to water absorption, thermal stability, damping properties and durability of some hybrid composites were collected from the literature.

The results showed that hybridization with inorganic fibres improves both the mechanical properties of composites and their thermal stability. Hybridization has improved the water absorption resistance of all composite systems and some after hydrothermal aging. Plant fibres reduce the price of the material more than synthetic fibres. Synthetic fibres, on the other hand, extend the life of hybrid composites. The hybridization allowed to establish a balance between mechanical performance and cost, while ensuring the environmentally friendly aspect of the composite.

Better performance is also achieved for structured hybrid composites depending on the orientation, length and fibre ratio, as well as the stacking and reinforcement architecture.

المخلص

وأجريت بحوث ببليوغرافية على تركيبات هجينة مصفوفة بالبوليمر معززة بتعزيزات ، أحدهما من أصل الخصري.

وتم جمع تقييم للخصائص الميكانيكية في قوة الشد والانحناء والتأثير ، فضلا عن مقاومة امتصاص المياه ، والاستقرار الحراري ، وخصائص التخفيض ، واستدامة بعض التركيبات الهجينة.

وأظهرت النتائج أن التهجين بالألياف غير العضوية يحسن الخواص الميكانيكية للمركبات واستقرارها الحراري. وأدى التهجين إلى تحسين مقاومة امتصاص المياه لجميع النظم المركبة وبعضها بعد الشيخوخة المائية الحرارية. وتخفيض الألياف النباتية أسعار المواد أكثر من الألياف الاصطناعية. ومن ناحية أخرى ، تمد الألياف الاصطناعية عمر التركيبات الهجينة. وأتاحت عملية التهجين إقامة توازن بين الأداء الميكانيكي والتكلفة ، مع ضمان الجانب الملائم للبيئة في المركب.

كما يتحقق أداء أفضل للمكونات الهجينة المهيكلة تبعا لنسبة التوجيه والطول والألياف ، فضلا عن هيكل التكديس والتعزيز.

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS

DÉDICACES

RÉSUMÉ

INTRODUCTION GÉNÉRALES.. 1

Chapitre I GÉNÉRALITÉS SUR LES MATÉRIAUX COMPOSITES

I.1. Introduction..... 2

I.2. Le marché des matériaux composites 3

I.3. Définition d'un composite 5

I.4. Les constituants d'un matériau composite 6

I.4.1.La matrice. 6

I.4.1.1. La matrice thermodurcissable.....7

I.4.1.2. La matrice thermoplastique.....7

I.4.2.Les charges.....7

I.4.2.1.Types des charges.....8

A. Suivant leur nature chimique.....8

a.Inorganiques.....8

b.Organiques.....8

B.Suivant leur forme.....9

b.1.Charges Particulaires.....9

b.2.Renfort fibreux.....10

I.5.Fibres/Charges végétales..... 10

I.5.1.Composition des fibres et charges végétales.....11

I.5.1.1. La cellulose. 12

I.5.1.2. Les hémicelluloses..... 13

I.5.1.3. Les lignines.....	14
----------------------------	----

Chapitre II PARAMETRES AFFECTANTS LES PROPRIETES DES COMPOSITES/RENFORTS VEGETAUX

II. Paramètres Affectants les propriétés des composites renforcés par des fibres/charges de nature végétale.....	15
II.1. Dispersion de la fibre.....	15
II.2. Adhésion fibre-matrice.....	16
II.3. Facteur de forme du renfort longueur/ diamètre (L/D).....	17
II.4. Orientation des fibres.....	18
II.5. Influence du taux de renfort.....	19
II.6. Influence de la forme du renfort.....	19

CHAPITRE III COMPOSITES HYBRIDES À FIBRES/CHARGES VÉGÉTALES

III. Composites Hybrides à Fibres ou Charges Végétales.....	21
III.1. Composites hybride a matrice polypropylène.....	21
III.2. Composites hybride a matrice époxyde.....	25
III.3. Composites hybride a matrice polyester.....	28
III.4. Composites hybride a matrice phénolique.....	30
CONCLUSION GÉNÉRALE.	33
BIBLIOGRAPHIE.	35

LISTE DES ABRÉVIATIONS

ATG: Analyse thermogravimétrique.

TP : thermoplastique.

TD : thermodurcissable.

DSC: Analyse calorimétrique différentielle à balayage.

DMA: Analyse dynamique mécanique.

PP: Polypropylène.

Xc (%): Taux de cristallinité.

T_g : Température de transition vitreuse.

E: Module d'Young.

σ: Contrainte en traction.

LISTE DES FIGURES

Figure.I.1. Le marché mondial des composites par grandes régions du monde en 2019.....	3
Figure.I.2. Matériaux composites.....	5
Figure.I.3. Types de matrice.....	6
Figure.I.4. Composition d'une fibre végétale.....	11
Figure.I.5. Molécule de cellulose (n répétitions du motif cellobiose).....	12
Figure.I.6. Représentation des microfibrilles constituant les fibres de cellulose.....	12
Figure.I.7. Principaux glucides constituant les hémicelluloses.....	14
Figure.I.8. Représentation schématique de la lignine.....	14
Figure.II.1. Représentation schématique du changement de l'orientation des fibres durant l'écoulement, a) Distribution initial aléatoire, b) Rotation avec cisaillement à l'écoulement, c) Alignement durant élongation à l'écoulement.....	18
Figure.III.1. Quelques résultats obtenus pour un composite hybride avec différentes séquences d'empilement : a) courbes contrainte-déformation, b) déformation à la rupture (F : fibres de lin, G : fibres de verre, ROM : loi des mélanges,le numéro indique le nombre de couches).....	31
Figure.III.2. Évolution du module d'un composite hybride en fonction de la fraction volumique des fibres de verre.....	32



**INTRODUCTION
GENERALE**

INTRODUCTION GENERALES

En raison de leurs propriétés spécifiques, prix bas, avantages pour la santé, renouvelable et recyclable, les fibres naturelles ont reçu une attention croissante au cours des dernières décennies comme une alternative aux fibres synthétiques utilisées dans le renforcement des composites polymères. Néanmoins, les fibres naturelles sont hydrophiles, ce qui montre une forte sensibilité à l'absorption d'humidité et une faible résistance aux conditions environnementales humides. En outre, ils montrent propriétés mécaniques assez faibles et variables ainsi qu'une faible adhérence avec les matrices polymériques. Pour ces raisons, même si les composites de fibres naturelles sont aujourd'hui largement utilisés dans plusieurs applications industrielles, y compris l'automobile, la marine et l'infrastructure, leurs applications sont limitées aux composants intérieurs non structuraux ou semi-structuraux. [1]

Dans un tel contexte, la production de composites polymères renforcés de fibres naturelles et de contreparties synthétiques peut représenter un compromis valable appliqué. Cette approche a été largement exploitée dans la littérature, et les composites résultants ont montré un équilibre approprié entre les propriétés mécaniques, la stabilité thermique, la tolérance au vieillissement par rapport aux environnements humides ou agressifs, le coût et la protection de l'environnement. [1]

Ce mémoire a été orienté vers une recherche bibliographique sur ces nouveaux matériaux composites hybrides renforcés par des fibres végétales et synthétiques. L'aspect important de cette étude est la connaissance du comportement de ces matériaux vis-à-vis de l'utilisation de l'hybridation et de voir ce qui on ressort des différents travaux effectués dans cet axe.

Le mémoire est réparti en trois chapitres :

- Dans le premier, nous avons traités les notions générales des matériaux composites. Cette dernière nous a servi de point de départ à notre étude.
- Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté les paramètres affectant les propriétés des matériaux composites renforcés par des fibres végétales.
- En dernier lieu, le troisième chapitre correspond à une synthèse bibliographique sur les résultats obtenus pour Les composites hybrides a fibres/charges végétales.

CHAPITRE I

GENERALITES SUR LES

MATERIAUX COMPOSITES

CHAPITRE I

GENERALITES SUR LES MATERIAUX COMPOSITES

I.1. Introduction

Les polymères sont recherchés pour leurs propriétés physico-chimiques, mécaniques ou encore optiques, électriques... Cependant, au moment de la conception de l'objet, on se rend souvent compte que les propriétés du polymère seul sont insuffisantes. En effet, la technologie moderne a besoin de matériaux qui allient à la fois une rigidité, une résistance mécanique, une ténacité élevée et une grande légèreté. Aucun matériau simple ne permet de combiner ces caractéristiques physiques; c'est pourquoi, depuis un certain nombre d'années, on cherche à obtenir des matériaux combinant différentes propriétés : les matériaux composites. [2]

Les composites peuvent offrir des solutions alternatives pour la réalisation de constructions mécaniquement exigeantes, et innovantes dans le cadre du développement durable. De nos jours, l'usage des matériaux composites dans différents domaines technologiques (microélectronique, aéronautique, transports...) croît de plus en plus. [3]

L'idée de combiner plusieurs composants pour produire de nouveaux matériaux (matériaux composés) avec de nouvelles propriétés n'est pas nouvelle, car la première utilisation de ces matériaux remonte à 1500 avant JC lorsque les Égyptiens et les premiers Mésopotamiens ont utilisé un mélange d'argile et de paille pour créer des bâtiments solides et durables plus tard et en 1200 après JC, inventé Premier arc à poulies des Moghols. Utilisant une combinaison de bois, d'os et de colle animale, ces bretelles sont très solides êtres précises et compactes grâce à la technologie, ce fut l'arme la plus puissante de l'armement jusqu'à l'invention de la poudre à canon. [4]

Bien que les matériaux composites soient connus sous diverses formes à travers l'histoire de l'humanité, l'histoire des composés modernes est apparue au XVIIIe siècle, lorsque l'utilisation des matériaux composites s'est étendue à la plupart des domaines industriels. [5]

I.2. Le Marché des matériaux composites

Le marché mondial des matériaux composites [6] est très fragmenté. Il est segmenté par type de matière première (fibre de verre, fibre de carbone, fibre naturelle, autres), par type de résine (composites thermodurcissables, composites thermoplastiques) [7], par procédé de fabrication (stratification, moulage et injection notamment) et par domaine d'application. Les principaux secteurs industriels utilisateurs sont l'aéronautique, l'automobile, l'éolien, le bâtiment, et le maritime. Tous ces secteurs connaissent, depuis quelques années, une forte croissance liée à de nouvelles applications, de nouvelles réglementations environnementales et de nouveaux procédés de fabrication. Légers, résistants, demandant peu de maintenance, de grande flexibilité d'utilisation et de moins en moins chers, l'utilisation des matériaux composites a pénétré l'ensemble des activités industrielles. Dans les développements qui suivent nous allons présenter les grandes tendances d'évolution de ce marché (1). Nous illustrerons en particulier les caractéristiques du marché de la fibre de carbone (2) et de celui de l'aéronautique (3). Nous concluons par une rapide revue des principaux projets aéronautiques à même de développer la demande en aéro-composites (4).

Estimé à 90,6 milliards de dollars en 2019, le marché mondial devrait, avec un taux de croissance annuel moyen de 7,7 %, atteindre plus de 131,6 milliards en 2024. [8]

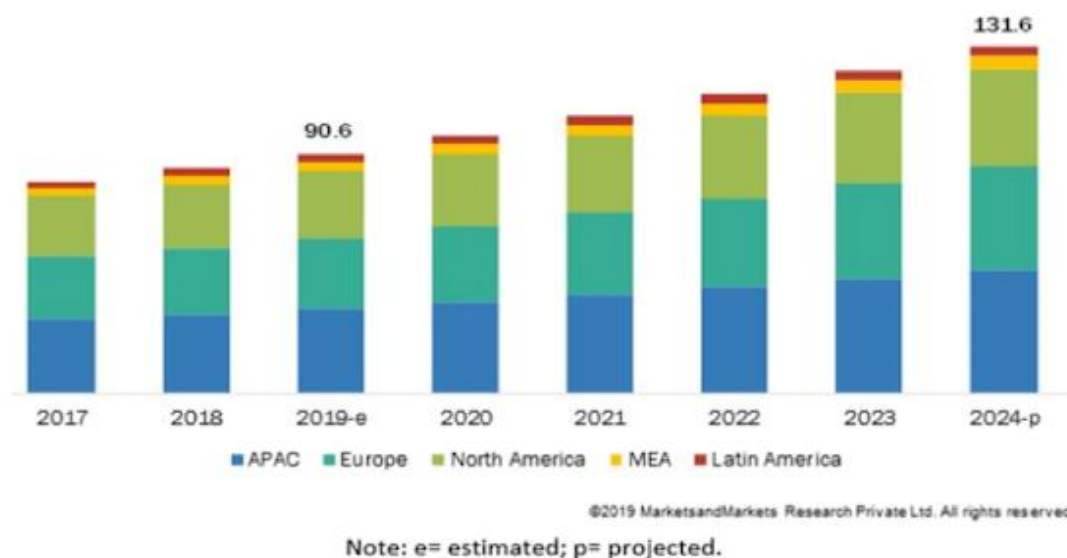


Figure.I.1. Le marché mondial des composites par grandes régions du monde en 2019.

[8]

Selon l'étude du JEC World Observer [8], les traits suivants marquent le marché en 2019 [9,10] :

- Une production de 17,7 mégatonnes, tout type de matériau, estimée à plus de 90 milliards de dollars ;
- En termes de pays et de zones géographiques, le marché est relativement concentré. La Chine (28 %) et l'Amérique du Nord (26 %) représentent à eux deux 54 % de la production suivies de l'Europe (21 %) et du reste de l'Asie (19 %). À l'horizon de 2024, ces rangs semblent se maintenir.
- Les résines thermodurcissables sont les plus utilisées (61 %) devant les résines thermoplastiques (38 %).
- Les fibres de verre sont de loin les renforcements les plus utilisés (88 %) devant les fibres naturelles (11 %) et les fibres de carbone (1 %).
- Les principales industries utilisatrices sont, en volume, les transports (28 %) devant la construction (20 %), l'électronique et l'électrique (16 %) et les canalisations et réservoirs (15 %). [9,10]

Les utilisations industrielles dépendent fortement de la nature des produits fabriqués. Ainsi les composites à base de fibres de verre, sont principalement utilisés dans les secteurs de l'éolien, des canalisations, des infrastructures, de l'électricité et de l'électronique, ainsi que dans le secteur des loisirs maritimes. Les composites thermodurcissables sont quant à eux majoritairement employés dans les secteurs des transports, de l'aérospatiale et de la défense, de l'énergie éolienne, la fabrication de bateaux, l'électricité et l'électronique. [11]

Selon le rapport *Composites Market Global Forecast* de 2020 , les dix principaux acteurs du marché mondial des composites, tout type de matériau, sont Owens Corning (États-Unis), Toray Industries, Inc. (Japon), Teijin Limited (Japon), Mitsubishi Chemical Holdings Corporation (Japon), Hexcel Corporation (États-Unis), SGL Group (Allemagne), Nippon Electrical Glass Co. Ltd. (Japon), Koninklijke TenCate bv. (Pays-Bas), Huntsman International LLC. (États-Unis), et Solvay (Belgique). Comme on peut le constater, le marché est largement dominé par des entreprises japonaises (4 parmi les 10) et américaines (3 parmi les 10). [12]

I.3. Définition d'un composite

Les matériaux composites sont généralement des matériaux solides, constitués à l'échelle microscopique par l'association de deux ou plusieurs matériaux aux caractéristiques complémentaires. Cette association leur confère, à l'échelle macroscopique, un ensemble de propriétés physiques, que chacun des constituants pris isolément ne possède pas. Ces propriétés sont liées aux propriétés des matériaux qui les constituent, à leur distribution géométrique et à leurs interactions mutuelles. [13]

Un matériau composite consiste, dans le cas le plus général, d'une ou plusieurs phases discontinues réparties dans une phase continue. Dans le cas de plusieurs phases discontinues de natures différents, le composite est dit *hybride*. La phase discontinue est habituellement plus dure avec des propriétés mécaniques supérieures à celles de la phase continue. La phase continue est appelée la *matrice*. La phase discontinue est appelée le *renfort* ou *matériau renforçant*.

Le renfort qui peut être des charges renforçant, mais le plus souvent sous forme fibreuse ou filamentaire, assure l'essentiel des propriétés mécaniques. La matrice joue le rôle de liant afin de protéger le renfort des agressions environnementales, de le maintenir dans sa position initiale et d'assurer la transmission des efforts. Entre le renfort et la matrice, existe une zone de liaison appelée *interface*. Un matériau composite est la plupart du temps hétérogène et anisotrope (dont les propriétés mécanique dépendent de la direction). [14]



Figure.I.2.Matériaux composite. [14]

I.4. Les constituants d'un matériau composite

Un matériau composite consiste dans le cas le plus générale d'une ou plusieurs phases discontinues réparties dans une phase continue. La phase discontinue est habituellement plus dure avec des propriétés mécaniques supérieures à celles de la phase continue. La phase continue appelle matrice et la phase discontinue appelle renfort ou matériau renforçant. [15]

I.4.1. La matrice

La matrice est constituée de résine mélangée, pour améliorer ses caractéristiques, à une charge qui facilite aussi la mise en œuvre et diminue le coût de la production. Le mélange est considéré mécaniquement comme une phase homogène, et nous obtenons ainsi un matériau composite formé d'un renfort et d'une matrice. Le rôle de la matrice est d'assurer le lien entre les fibres et de transmettre les sollicitations. Elle assure la résistance du matériau dans le sens transverse du renfort, ainsi qu'une protection physico-chimique des fibres contre les agents nocifs de l'environnement. De plus elle conditionne directement la tenue thermique, et la résistance à la compression et au cisaillement inter-laminaire.

Les résines utilisées doivent être assez déformables et doivent présenter une bonne compatibilité avec les fibres. Elles doivent également avoir une masse volumique faible de manière à conserver au matériau composite des caractéristiques mécaniques spécifiques élevées La classification des types de matrices couramment rencontrées est donnée sur la figure (I. 3). [16]

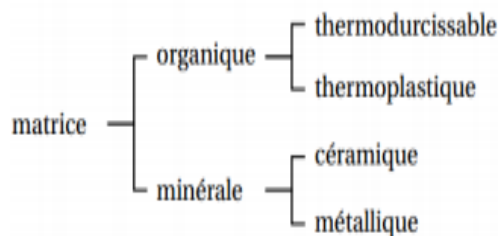


Figure.I.3.Types de matrice. [16]

Dans notre travail on s'intéresse aux composites à matrice organique, qu'on peut classer en deux grandes familles : les thermoplastiques et les thermodurcissables.

I.4.1.1. La matrice thermodurcissable

Les polymères thermodurcissables sont constitués d'un réseau tridimensionnel de macromolécules. Ils sont obtenus à partir de monomères polyfonctionnels par polycondensation ou polyaddition. Les monomères réagissent entre eux ou avec de petites molécules servant de liant. [17]

Les thermodurcissables se solidifient de manière irréversible lorsqu'ils sont chauffés. Ils ne peuvent pas être remodelés plus tard par un nouveau chauffage. Les thermodurcissables sont habituellement des polymères tridimensionnels dans lesquels le taux de réticulation entre les chaînes est très important une fois qu'ils sont durcis par la chaleur. Les réticulations restreignent les mouvements des chaînes et mènent à un matériau rigide, solide et résistant. Ils sont principalement utilisés dans l'industrie automobile et les constructions. Ils servent également créer des jouets, des vernis, des coques de bateau et des colles. [18]

I.4.1.2. La matrice thermoplastique

Les thermoplastiques se présentent sous forme de chaîne linéaires ou branchées qui ne sont liées entre elles que par des liaisons faibles (Van der Waals ou hydrogène). Il faut les chauffer pour les mettre en forme et les refroidir pour les fixer. Cette opération est réversible. Elles ont des faibles propriétés mécaniques ; un renforcement par l'incorporation de charge leur confère une tenue thermique et mécanique améliorée et une bonne stabilité dimensionnelle. [19]

Les matrices thermoplastiques les plus courantes sont le poly (chlorure de vinyle que l'on trouve dans les colles et adhésifs, le polyéthylène donc ce sert pour fabriquer les jouets, les bouteilles de shampoing ou les sacs de supermarchés, le polypropylène pour les boîtes alimentaires ou les revêtements de sols, le polystyrène qui intervient dans les meubles, emballage, la construction. [20]

I.4.2. Les Charges

L'incorporation de charges ou renforts dans les polymères est connue comme l'une des techniques permettant d'améliorer les propriétés des produits finis et d'élargir le domaine d'application des matières plastiques, elle permet aussi de faciliter la mise en œuvre et de réduire le coût de fabrication d'un matériau. De plus, elle est un moyen

économique de développer un nouveau matériau pour répondre à des applications parfois bien spécifiques [20,21].

Afin de profiter pleinement de l'effet renforçant des charges de haut module, il convient d'augmenter les interactions entre le renfort et la matrice. Cela passe par des traitements de surface du renfort ou des charges, tel que l'ensimage des fibres de verre, les traitements chimie des charges végétales, ou encore par l'ajout d'un tiers agent, appelé agent comptabilisant ou de couplage, qui va favoriser l'affinité entre le renfort et la matrice. [21]

I.4.2.1.Types des charges

A)- Suivant leur nature chimique on peut distinguer deux grandes familles de charges:

a)- Inorganiques : dans cette catégorie, on y trouve du renfort de nature minérale ou métallique.

a.1)- Minérales : telles que les carbonates de calcium, les sulfates de calcium, qui sont souvent utilisées comme additif permettant de diminuer le coût de revient du matériau. Elles permettent aussi de modifier certaines propriétés mécaniques. [22]

La fusion puis le fibrage de divers minéraux permet de produire aussi des fibres ou des laines minérale les plus ou moins denses et stables. Il existe deux types de fibres minérales : celles qui sont directement tissées de roches (exemples : amiante, wollastonite, sépiolite) et celles qui sont artificiellement produites à partir de minéraux (exemples : fibre de verre ou laine de verre produites à partir de la silice, laine de roche, fibre céramique réfractaire, fibre d'alumine). Les minéraux recherchés pour produire des fibres le sont pour leurs qualités d'inertie chimique et/ou thermique, parfois pour leurs propriétés optiques ou piézoélectriques mais d'abord pour leurs propriétés vitrifiâtes. [26]

a.2)- Métalliques : qui permettent de conférer au matériau des propriétés électriques, ou d'améliorer leur comportement thermique, tels que des fils d'acier, particules de carbure de silicium, fibres de carbone, alumine, bore. [29]

b)- Organiques: dans cette catégorie, on y trouve des renforts naturels végétaux et animaux, mais aussi synthétiques.

b.1)- Végétal : qui comprennent des fibres provenant des poils séminaux de graines (coton, kapok) ; des fibres libériennes extraites de tiges de plantes (lin, chanvre, jute, ramie) ; des fibres dures extraites de feuilles (sisal), de troncs (chanvre de manille), d'enveloppes de fruits (noix de coco). [22,23]

b.2)- Animal : qui proviennent des poils, telle que la toison animale, et des sécrétions telle que la soie. [22]

b.3)- Synthétique : Ces charges ont un meilleur comportement en compactions que les renforts naturels. Ces renforts synthétiques sont moins rugueux, sont continus et sont dotés de fibres bien séparées, bien orientées et ayant des sections lenticulaires uniformes comme: (kevlar, polymérique, élastodiène, vinylal, polyurée, polyuréthane, polyamide). [30]

B)- Suivant leur forme : Ces charges ou renforts peuvent être de nature variable et sont présentées sous différentes formes. Comme on a pu le constater des exemples précédents, les charges peuvent être renforçantes, si l'action est bénéfique sur les propriétés entre autre mécanique du matériau obtenu, ou inerte si l'effet se restreint, uniquement, au le coût de revient [31]. On peut adopter cette répartition pour illustrer cela.

b.1)- Charges Particulaires

b.1.1)- Renforçantes

Elles sont constituées de très fines particules (sphères, écailles, paillettes, ...) qui, lorsqu'elles sont bien dispersées dans la matrice, permettent de répartir les contraintes dans la masse du composite. Dans ce type de charge, les plus utilisées sont les billes de verre, creuses ou non, de diamètre compris entre 10 et 150 μm . N'étant pas poreuses, elles n'absorbent pas la matrice et permettent donc de ne pas trop faire augmenter la viscosité; elles améliorent la résistance aux contraintes de flexion et de compression, la dureté superficielle et permettent aussi de diminuer la masse volumique du mélange. Elles ont la faculté d'augmenter les propriétés électriques des matériaux, mais aussi d'améliorer la rigidité mécanique et touchent les propriétés physico-chimiques en permettant au matériau d'avoir une meilleure tenue aux agents chimiques. [23]

b.1.2) Inertes :

De par leur faible coût, leur rôle essentiel est de réduire le prix de revient du matériau. Elles permettent aussi d'améliorer la mise en œuvre et certaines propriétés telles que la dureté et la résistance à la rupture. Ce type de charge regroupe surtout les matières minérales telles que : les silices, les kaolins (silicates d'aluminium hydratés), le carbonate de calcium, la craie qui permet de diminuer le prix de revient des mélanges, le talc qui confère aussi aux mélanges de bonnes propriétés mécaniques et une grande résistance aux acides. [23, 24]

b.2)- Renfort Fibreux : il est utilisé uniquement pour l'amélioration des propriétés mécaniques des matériaux composites entre autre à matrice polymérique. [22]

D'origine organique, animale ou bien végétale, ou encore des fibres minérales, toutes sont couramment utilisées car ce sont les fibres les plus disponibles. Leur structure complexe est assimilable à celle des matériaux composites renforcés par des fibrilles de cellulose disposées en hélice. [25]

I.5. Fibres/Charges végétales

Les fibres végétales sont des structures biologiques fibrillaires composées de cellulose, hémicelluloses et de lignine. En proportion relativement faible d'extractibles non azoté, de matière protéique brute, de lipide et de matières minérales. Les proportions de ces constituants dépendent énormément de l'espèce, de l'âge et des organes de la plante. [26]

Les fibres végétales sont classées en quatre groupes suivant leur provenance à savoir : les fibres de feuille, de tiges, de bois et de surface. [27]

- **Les fibres de feuilles :**

Ces fibres sont obtenues grâce au rejet des plantes monocotylédones. Les fibres sont fabriquées par chevauchement de paquet qui entoure le long des feuilles pour les renforcer ces fibres sont dures et rigides les types de fibres de feuilles les plus cultivées sont la fibre de sisal, d'abaca. [26-27]

- **Les fibres de tiges :**

Les fibres de tige sont obtenues dans les tiges des plantes dicotylédones. Elles ont pour rôle de donner une bonne rigidité aux tiges de plantes. Les fibres de tige sont commercialisées es sous forme de paquet de cor et en toute longueur. Les fibres de

tige les plus utilisées sont les fibres de jute, de lin, de ramie, de kenaf, et de chanvre. [26-27]

- **Les fibres de bois :**

Les fibres de bois proviennent du broyage des arbres tels que les bambous ou les roseaux. Elles sont généralement courtes. [26-27]

- **Les fibres de surface :**

Les fibres de surface entourent en général la surface de la tige, de fruits ou de grains. Les fibres de surface des grains constituent le groupe le plus important dans cette famille de fibres. Nous citons entre autres le coton et la noix de coco. [26-27]

Les fibres végétales sont de plus en plus utilisées comme renfort dans les matériaux de constructions. Elles constituent en effet une ressource renouvelable, naturellement biodégradable, et disposant de nombreuses qualités mécaniques et hydriques.

Les plus utilisées sont les fibres libériennes, comme le Kenaf, le jute, la ramie, le palmier et surtout le chanvre et le lin. [28]

I.5.1.Composition des Fibres et charges végétales

Chaque fibre végétale est assimilable à un matériau composite renforcé par des fibrilles de cellulose, la matrice étant principalement composée d'hémicellulose et de lignine. En réalité, dans la structure de la fibre végétale, la lignine constitue la matrice et l'hémicellulose joue le rôle d'agent comptabilisant entre la cellulose et la lignine. [32]

La composition chimique des fibres végétales est formée de trois principaux constituants : la cellulose, l'hémicellulose et la lignine. [33]



Figure.I.4.Composition d'une fibre végétale. [33]

I.5.1.1. La cellulose

La cellulose représente la molécule biologique la plus abondante sur terre. D'un point de vue chimique, la cellulose est une macromolécule constituée par une très longue chaîne stéréo régulière composée de maillons de glucose. (Figure I.5). Le motif de répétition est le dimère cellobiose. Le nombre de motifs de répétition ou le degré de polymérisation varie suivant l'origine de la cellulose. Ce polymère présente un grand intérêt du point de vue industriel puisque de nombreuses fibres (coton, chanvre, jute, lin...) sont composées de cellulose. [34]

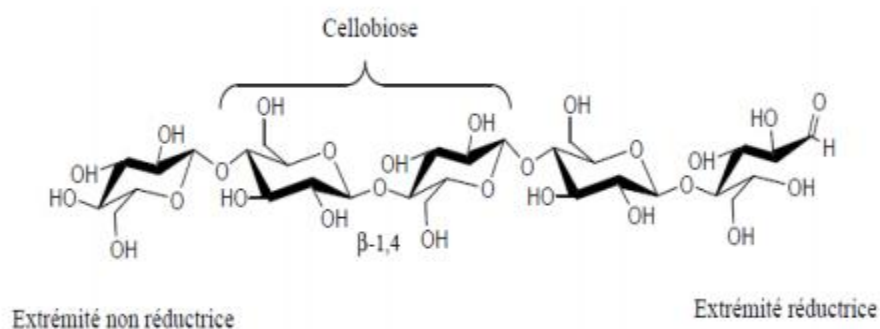


Figure.I.5.Molécule de cellulose (n répétitions du motif cellobiose). [34]

La cellulose possède une structure fibrillaire et partiellement cristalline (Figure I.6), les micros fibrilles de cellulose sont constituées de zones cristallines ordonnées et de zones amorphes totalement désordonnées. [34]

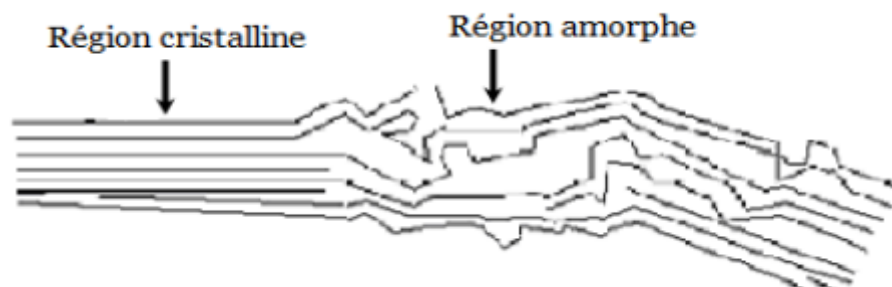


Figure.I.6.Représentation des microfibrilles constituant les fibres de cellulose. [34]

Dans la zone cristalline, les chaînes celluloses sont disposées parallèlement les unes aux autres, liées par des liaisons hydrogènes intra et intermoléculaires. Toutes les propriétés de la cellulose sont étroitement corrélées à la forte densité des liaisons hydrogène qui se développent entre les chaînes. Les interactions moléculaires sont fortes et

assurent l'essentiel de la cohésion tout en empêchant la pénétration des réactifs. Grâce à sa grande cohésion, la cellulose est insoluble dans la plupart des solvants. La cellulose est de nature très hydrophile. Le remplacement d'une partie des interactions inter-chaînes par des liaisons hydrogènes entre la cellulose et l'eau provoque une plastification du matériau et donc une diminution de ses caractéristiques mécaniques.

I.5.1.2. Les hémicelluloses

Dans la plupart des fibres naturelles, la cellulose est mélangée à des hémicelluloses qui sont également des polysaccharides. Les hémicelluloses constituent une classe de polymères très variés solubles dans l'eau et pouvant être extraits de la paroi des cellules végétales par des solutions alcalines. En plus du glucose, les monomères des hémicelluloses peuvent être de la xylose, du mannose, du galactose, du rhamnose, ou de l'arabinose (Figure I.7). Les hémicelluloses sont composées majoritairement de D-pentoses, parfois de petites quantités d'oses de configuration L. L'xylose est toujours l'ose le plus représenté mais les acides mannuronique et galacturonique sont aussi souvent présents.

Les hémicelluloses ont un degré de polymérisation compris entre 200 et 300 et leur structure dépend de l'espèce végétale (type cellulaire, localisation dans la paroi ou bien encore âge des tissus). [35-36]

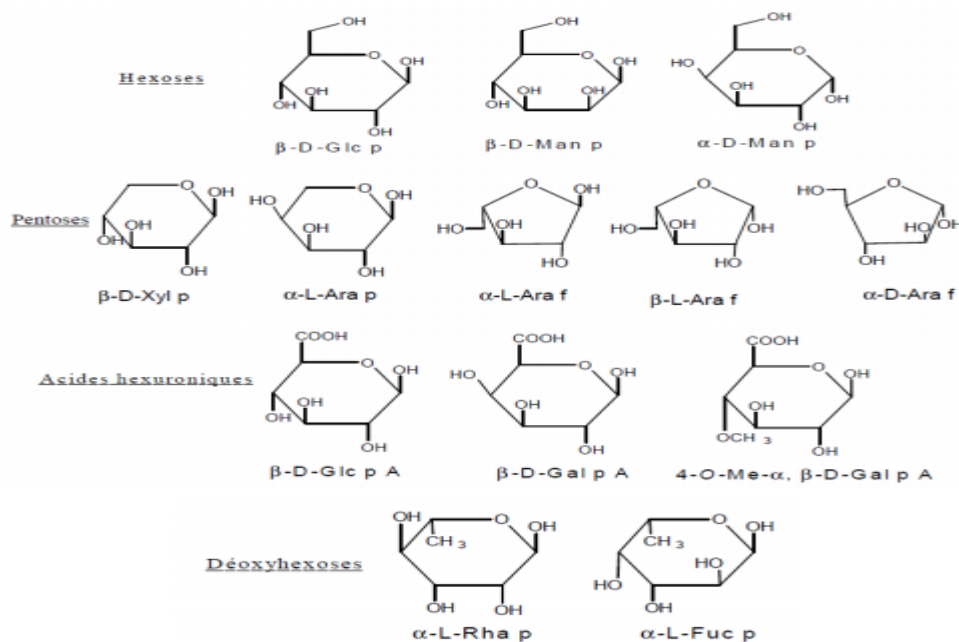


Figure.I.7.Principaux glucides constituant les hémicelluloses. [35]

I.5.1.3. Les lignines

La lignine ou les lignines sont des polymères tridimensionnels provenant de la polymérisation radicalaire de trois alcools phénylpropénoïques (l'alcool coumarylique, l'alcool coniférylique et l'alcool sinapylique), dont la structure dépend également de l'espèce végétale. On ne peut pas de ce fait leur attribuer une structure moléculaire définie. Elles sont composées de constituants aliphatiques et aromatiques (Figure I.8).

La lignine contribue à la résistance mécanique des parois cellulaires et soutient la cohésion des fibres dans la partie boisée. En considérant la fibre comme un matériau composite, la lignine représenterait la matrice. Elle sert d'agent complexant pour les minéraux et aide à la conservation de l'humidité dans les plantes. La lignine est responsable de la rigidité et de la dureté des bois et des plantes. Elle est peu sensible à la dégradation biologique, elle crée une barrière morphologique à la pénétration et à la progression des agents pathogènes, et contribue à la protection naturelle des végétaux contre certaines attaques parasitaires. [37]

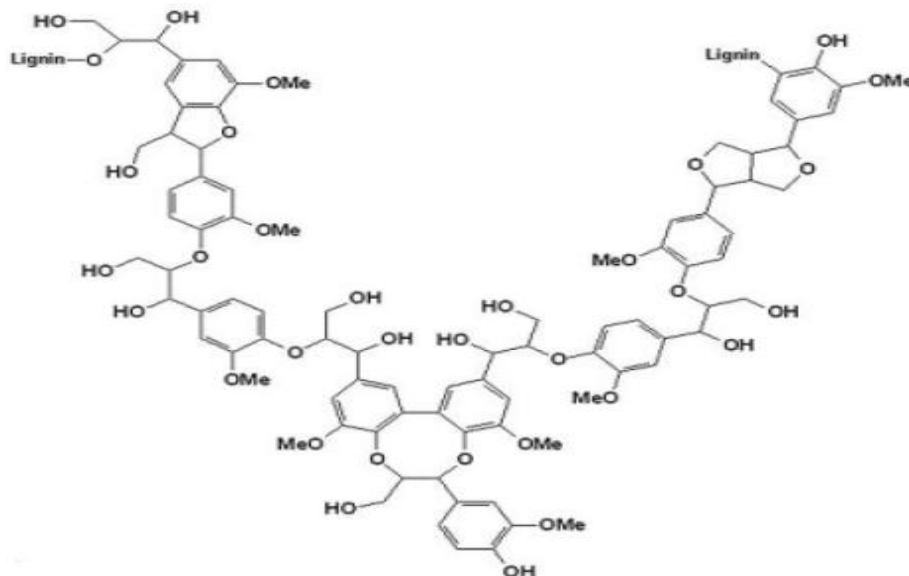


Figure.I.8.Représentation schématique de la lignine. [37]

CHAPITRE II

PARAMETRES AFFECTANTS LES

PROPRIETES DES

COMPOSITES/RENFORTS

VEGETAUX

CHAPITRE II

PARAMETRES AFFECTANTS LES PROPRIETES DES COMPOSITES/RENFORTS VEGETAUX

II. Paramètres Affectants Les Propriétés Des Composites Renforcés Par des Fibres/Charges de Nature Végétale

Les propriétés du matériau composite dépendront de la nature, de la texture et de la forme du renfort, de sa quantité introduite, de la qualité de l'interface matrice/renfort et enfin du procédé de mise en œuvre. On peut donc imaginer une infinité de combinaison matrice/charge qui permettrait d'obtenir des matériaux composites. Ces différentes configurations dépendent de l'utilisation finale du matériau et du procédé de mise en œuvre. [50]

Le renforcement des matériaux thermoplastiques par les fibres cellulosiques est gouverné par les paramètres suivants: dispersion de la fibre, adhésion fibre-matrice, facteur de forme L/D, orientation des fibres, Taux de renfort, la forme du renfort ainsi que l'origine et la nature du renfort.

II.1. Dispersion de la fibre

La première exigence pour l'obtention de la performance des composites à partir des fibres cellulosiques courtes est la bonne dispersion de la fibre dans la matrice polymérique. Une bonne dispersion des fibres implique que les fibres sont séparées et ne sont pas agglomérées, et chaque fibre est entourée par la matrice. L'insuffisance de dispersion des fibres conduit à un mélange hétérogène contenant des agglomérats de fibres ou charges en raison des interactions fibre-fibre (charge-charge) ce qui constitue des défauts dans les matériaux composites. L'enchevêtrement des fibres trop longues l'une à l'autre enforce ces défauts. En conséquence, ceci favorise la formation des microfissures. [38]

Afin de palier à ce problème, plusieurs méthodes sont possibles, entre autre par le traitement des surfaces des fibres et charges ou par ajout des agents de couplage ou comptabilisant.

Dans leur travail, **Raj et ses collaborateurs. [39]** ont étudié l'influence du traitement de la surface du renfort fibreux par l'acide stéarique et l'huile minérale (agent mouillant) et d'agent de couplage (éthylène maléique) sur les propriétés des composites polypropylène/fibres cellulosiques. La résistance à la traction et le module des composites ont augmenté avec le taux de fibres, lorsque l'acide stéarique et l'huile minérale sont utilisés à une concentration de 1 % massique durant la transformation. L'acide stéarique a montré une meilleure amélioration de la dispersion des fibres dans les composites comparé à l'huile minérale.

Woodhams et ses collaborateurs. [40] ont utilisé un mélange thermocinétique pour mélanger les fibres avec les thermoplastiques. Les résultats trouvés ont montré que la technique de mélangeage est efficace pour la dispersion des fibres cellulosiques dans la matrice. Cette efficacité de la technique de mélangeage a été aussi confirmée par **Sanadi et ses collaborateurs. [51]** Ces derniers se sont intéressés à l'effet de plusieurs techniques de transformation sur les propriétés de polypropylène renforcé avec les fibres de sisal courtes. Les équipements utilisés étaient la presse, l'injection, mélangeur à deux cylindres et l'extrudeuse à double vis. Les fibres de sisal ont été traitées avec les silanes pour assurer une bonne compatibilité avec la matrice. Les résultats obtenus ont montré que la technique de transformation a eu beaucoup d'influence sur les propriétés des composites. La meilleure méthode de transformation est l'extrudeuse à double vis. La bonne dispersion des fibres est généralement l'objectif ultime des processus de mélangeage. Les différentes techniques de mélangeage ne produisent pas des composites avec le même degré de dispersion de fibre.

II.2. Adhésion fibre-matrice

L'adhésion fibre-matrice joue un rôle très important pour le renforcement des composites à fibres cellulosiques. Si une force est exercée, les contraintes ne sont pas appliquées directement aux fibres mais à la matrice. Pour avoir des composites avec d'excellentes propriétés mécaniques, la contrainte doit être transférée de la matrice aux fibres. Ceci, nécessite une bonne interaction et adhésion entre les fibres et la matrice.

Une bonne adhésion fibre-matrice dépend d'une bonne mouillabilité de la fibre par la matrice. La mouillabilité (ou mouillage caractérise la relation physique d'un liquide en contact avec un solide. [41]

Rappelons que l'étude des interactions entre un solide et un liquide est une des méthodes qui permette de caractériser la surface du solide et de prévoir ainsi son aptitude à établir des liaisons avec d'autres matériaux.

Robin et ses collaborateurs. [42] se sont intéressés au renforcement du polyéthylène recyclé avec les fibres de bois ayant subi un traitement thermique dans une atmosphère contrôlée. Les matériaux composites présentent des propriétés améliorées lorsque le taux de fibres augmente et surtout dans le cas où les fibres sont traitées. Les propriétés telles que la résistance en flexion, la résilience et l'adhésion entre la matrice et les fibres sont élevées en comparaison aux composites avec les fibres de bois non traitées.

Razid et ses collaborateurs. [43] ont étudié l'influence des différents agents de couplage et la modification chimique de la surface de fibres de bois sur les liaisons d'interface polyéthylène/fibres. L'hydroxyde de sodium et l'acide sulfurique ont été utilisés comme des modificateurs de la surface de bois. Les agents de couplage utilisés sont le vinyltriméthoxy silane, le 3-méthacryloxypropyltriméthoxysilane et le 3-glycidoxypropyltriméthoxysilane. L'hydroxyde de sodium a amélioré l'adhésion interfaciale, tandis que les agents de couplage ont augmenté les liaisons d'interface et le meilleur effet est obtenu avec le vinyltriméthoxysilane.

II.3. Facteur de forme du renfort longueur/ diamètre (L/D)

Le rapport longueur/diamètre des fibres (**L/D**) est un paramètre critique pour les matériaux composites. Un moyen d'obtenir un facteur de forme élevé, consiste à varier les dimensions du diamètre et/ou sur la longueur de la fibre. Plus la taille de la fibre est petite, plus le facteur de forme est élevé, conduisant à un meilleur transfert de contraintes si l'adhésion à l'interface est forte. Par ailleurs,

Si le rapport L/D est inférieur à sa valeur critique, il y a insuffisance de transfert de contrainte et le renforcement par les fibres est alors inefficace, les fibres ne sont pas soumises

à leurs contraintes maximales. Si L/D est très élevé, les fibres peuvent être enchevêtrées durant le malaxage causant ainsi un problème de dispersion. [44]

II.4. Orientation des fibres

L'orientation des fibres est un autre facteur important qui influe sur le comportement des composites. Car les fibres sont rarement orientées dans les matériaux composites en une seule direction, laquelle est nécessaire pour que les fibres donnent un effet de renforcement maximal. Le degré de renforcement dans les composites à base des fibres courtes, dépend beaucoup de l'orientation individuelle de chaque fibre par rapport à l'axe d'étirement. Le changement de l'orientation des fibres se fait continuellement et progressivement durant la transformation du matériau composite à fibres courtes. Elle est reliée aux propriétés géométriques des fibres, les propriétés viscoélastiques de la matrice et la variation de la forme du matériau qui est produit par l'opération de transformation. Ces effets sont présentés sur la figure (II.1). [38]

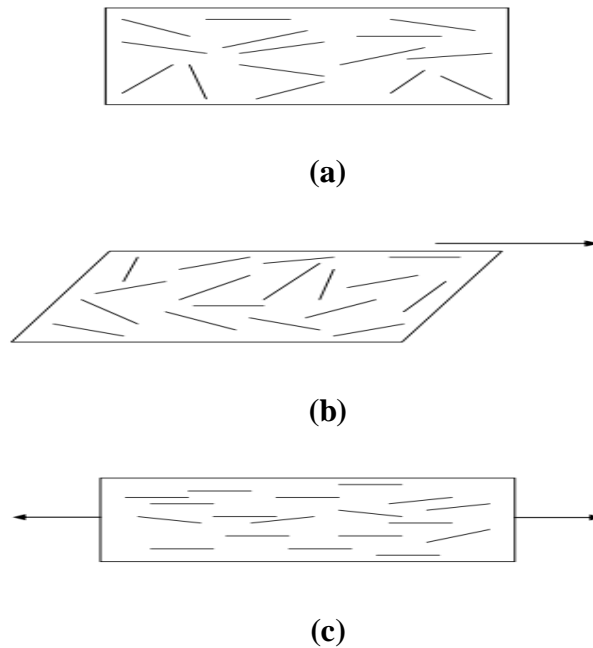


Figure.II.1. Représentation schématique du changement de l'orientation des fibres durant l'écoulement, a) Distribution initial aléatoire, b) Rotation avec cisaillement à l'écoulement, c) Alignement durant élancement à l'écoulement.[38]

II.5. Influence du taux de renfort

L'augmentation du pourcentage de renforts améliore quasi systématiquement la rigidité d'un composite. Cependant, une trop grande quantité de renforts implique une adhésion plus difficile qui conduit à une baisse de performances dans certains cas. D'après la littérature, il est assez peu fréquent de trouver des composites fabriqués qui contiennent un pourcentage de fibres supérieur à 50-60%, sans rencontrer de nombreuses difficultés lors du procédés de fabrication.

Adeosun et al. [45] ont observé, qu'à partir d'un taux de 50% en fibres, le matériau devient rugueux et la surface présente des ruptures. L'augmentation de la proportion de fibres lignocellulosiques a aussi pour conséquence directe, la multiplication des problèmes liés à l'usage d'un matériau biologique hygroscopique et putrescible.

Panaïtescu et ses collaborateurs. [49] ont étudié l'effet du taux de la charge sur les propriétés mécaniques du composite PP/fibres de sisal, et ont montré que la résistance à la traction et le module d'élasticité en traction augmentent avec le taux des fibres de sisal. Le module d'élasticité double de valeur lorsque le taux de charges varie de 0, 5, 10, 15, 20, et 25%. L'augmentation du pourcentage de renforts lignocellulosiques améliore quasi systématiquement les performances mécaniques des composites bois/polymère. Cependant, une trop grande quantité de bois implique une adhésion plus difficile qui conduit à une baisse de performance dans certains cas.

II.6. Influence de la forme du renfort

La taille de l'élément renforçant a naturellement une influence sur le procédé de fabrication mais aussi sur les propriétés mécaniques du composite. Le facteur de forme (L/d) est le paramètre le plus important. Des études consacrées à la comparaison entre des farines, des particules et des fibres ont montré que pour des facteurs de forme faibles (<10), les renforts se comportent comme des charges, alors que dans le cas contraire, les renforts confèrent des caractéristiques mécaniques améliorées. S'agissant des effets de la taille des particules de farine de bois, **Shaler et al. [46]** ont observé une meilleure résistance à la propagation de fissures pour de plus grandes particules alors qu'au même temps, il y avait une diminution de la résistance à l'amorçage de fissures (la concentration des contraintes est plus

importante). Dans une autre étude, **Stark et Sanadi**. [47] ont abouti à la conclusion que c'est bien le facteur de forme qui est le paramètre prépondérant qui influence les propriétés mécaniques. Ces résultats sont la suite des travaux de **Sanadi et al.** [48] où l'on distingue les particules, qui améliorent la rigidité, des fibres, qui améliorent la résistance mécanique.

CHAPITRE III

COMPOSITES HYBRIDES A

FIBRES/CHARGES VEGETALES

CHAPITRE III

COMPOSITES HYBRIDES A FIBRES/CHARGES VEGETALES

III. Composites Hybrides à Fibres ou Charges Végétales

Les composites hybrides sont un cas particulier des matériaux composites dont la phase dispersée est une combinaison d'au moins deux ou plusieurs fibres ou charges différentes. Ce terme est également appliquée aux composites dont la phase continue est un assemblage de plusieurs matrices [79]. Dans ce qui va suivre, nous nous intéresserons au premier type des matériaux hybrides, dont la matrice est un polymère et le renfort est un assemblage de deux fibres ou charges ou encore d'une charge et de fibre, l'une d'elle est d'origine végétale.

Beaucoup de travaux ont été mené dans ce contexte. L'aspect important de cette étude est la connaissance du comportement de ces matériaux vis-à-vis de l'utilisation de l'hybridation et de voir ce qui on ressort des différents travaux effectués.

III.1. Composites hybride à matrice polypropylène

La première étude abordée, est celle de **SAMAL et al.** [52] Les auteurs ont élaborés des composites hybrides à base de polypropylène renforcé par des fibres de bambou et des fibres de verre. Pour cela, ils ont utilisés une extrudeuse à double vis contre-rotative puis un moulage par injection. Le polypropylène greffé à l'anhydride maléique (MAPP) a été utilisé comme agent de couplage pour améliorer l'interaction entre les fibres et la matrice.

Dans leur étude, ils ont tenté de développer un composite hybride dans lequel le pourcentage de fibre de verre (FV) et de bambou (FB), a été varié afin d'évaluer l'effet de l'hybridation sur les propriétés des composites.

Initialement, les auteurs ont observé que les composites contenant 30 % en masse de fibre de bambou (FB) et un taux de 2% de PP-g-MA, présentaient des performances mécaniques optimales en terme de module d'Young et de conservation ainsi que la

résistance en traction. Cependant, les propriétés d'amortissement ont enregistré une diminution avec l'ajout des fibres de bambou et du PP-g-MA. Le remplacement de la fibre de bambou hydrophile par des fibres de verre beaucoup plus résistantes et plus rigides a augmenté, non seulement, les propriétés mécaniques des composites, mais a amélioré aussi la résistance des composites à l'absorption d'eau. Ils ont observé que l'interaction est améliorée entre les fibres de bambou/fibre de verre et le PP après le traitement avec le PP-g-MA. Ceci a été vérifié par les images MEB de la surface fracturée des composites hybrides. En effet, ils ont indiqué que le PP-g-MA peut améliorer efficacement l'adhésion fibres-matrice lorsqu'il est utilisé à un taux optimal de 2%. L'analyse thermique par ATG/DTG a permis aux auteurs de confirmer l'amélioration de la stabilité thermique des composites hybrides par rapport à celle des composites élaborés uniquement par la fibre de bambou.

Dans leur étude, **BENSALAH et al. [53]** se sont intéressés aux composites hybrides de polypropylène (PP) à base de graphite et d'argile. Ces composites ont été élaborés aussi par extrusion bivis et moulage par injection. Les résultats ont montré que les composites à base de graphite ou d'argile, ont d'excellentes propriétés mécaniques par rapport à la matrice PP vierge. Par exemple, une augmentation de 50% par rapport au PP, a été enregistrée pour le module d'Young. La présence de 20% de graphite et d'argile a également, amélioré la stabilité thermique du polypropylène. Ceci était reflété par l'augmentation de 40 à 50 °C de la température maximale de décomposition.

Les composites hybrides ont montré des propriétés thermiques et de traction améliorée, qui sont les principales propriétés requises pour les applications commerciales. Les fibres naturelles (animale et végétale) ayant une stabilité thermique élevée, contribuent efficacement à améliorer les performances thermiques du PP. En traction, la rigidité des fibres contribue énormément à conférer une résistance à la traction du PP en augmentant son module d'Young. Cependant, la présence des fibres dans le polymère diminue son écoulement et augmente sa viscosité, ce qui rend sa processabilité plus difficile. Il est nécessaire de noter que ces propriétés dépendent largement du taux de charge (fibres) dans le polymère.

En 2018, **TUSNIM et al. [54]** ont étudié l'effet du taux de charge sur les propriétés mécaniques du polypropylène renforcé par des fibres de laine et des fibres de jute. Les propriétés mécaniques ont d'abord été étudiées en utilisant différents taux de charge (5, 10

et 15%) dans le polymère, avec un rapport de 1:1 des deux charges fibreuses. Les composites ont été introduits dans une presse afin d'obtenir des éprouvettes destinées à la caractérisation mécanique en traction, flexion, choc et dureté. À partir de ces essais, ils ont observé que le composite contenant 15 % de fibres avait les meilleures propriétés. Ensuite, deux échantillons avec un taux de 15 % en charge (le taux de charge qui a montré les meilleures performances mécaniques) avec des rapports de fibres 1:3 et 3:1 ont été préparés. Ceci, afin de déterminer la contribution exacte de chaque charge dans l'amélioration des propriétés mécaniques du composite. Au cours des essais susmentionnés, il a été révélé que l'échantillon de laine et de fibre de jute au rapport 1:3 avait les meilleures propriétés. Ceci les a menés à conclure que la fibre de jute possède des propriétés mécaniques plus élevées que celles de la fibre de laine.

GUNTURU et al. [55] ont également étudié des composites hybrides à matrice PP, mais renforcé avec des fibres de banane/coco (B/C), afin développer un composite hybride combinant de bonnes propriétés mécaniques, économiques et une légèreté.

Bien que les propriétés mécaniques des composites hybrides aient été améliorées par la présence des deux fibres, les fibres de banane ont montré une contribution plus prononcée. Il s'est avéré que le taux des fibres des bananes, leur orientation ainsi que leur longueur, sont des facteurs importants dans l'amélioration et le contrôle des propriétés mécaniques du composite hybride. En outre, la mauvaise orientation de la fibre de coco et le pourcentage de lignine dans sa composition, conduit à une nette réduction des propriétés mécaniques du composite hybride.

Les propriétés mécaniques des composites hybrides PP renforcé de fibres B/C dépendent principalement du rapport d'aspect des fibres, de l'orientation des fibres et de leur distribution. La résistance à la traction maximale a été observée avec 20% de la fibre de banane et la résistance minimale a été enregistrée avec 5 % de la fibre de banane et 15 % de la fibre de coco.

Une étude similaire a été réalisée par **ANSHIDA et al. [64]** sur des composites hybrides à fibres courtes de banane / verre et à base de polystyrène. Lorsque la teneur en fibres de banane a été maintenue constante à 20% volumique, l'augmentation du taux volumique de fibres de verre a entraîné une amélioration des performances mécaniques de traction et en flexion, contrairement à l'allongement à la rupture qui a diminué. Les résultats ont montré que le renforcement hybride de leur composite a non seulement amélioré les propriétés en

traction mais il a également une réduction du coût du matériau final.

UAWONGSUWAN et al. [56] ont étudié l'effet de la taille et de la forme de la fibre de jute (FJ) sur les propriétés mécaniques des composites hybrides de polypropylène (PP) renforcé de fibre de verre/jute préparés par moulage par injection. Les résultats de cette étude ont conclu que :

Les propriétés mécaniques des composites FJ/PP dépendent, principalement, du rapport de forme des fibres de jute, de leur orientation ainsi que leur distribution. L'utilisation de fibres plus longues entraîne une rigidité élevée et une résistance au choc élevée. Cependant, le faisceau de fibres plus long affecte par conséquent la distribution et l'efficacité d'orientation de la fibre de jute, ce qui entraîne une réduction de la résistance à la traction.

L'incorporation de 10 % en poids de fibres de verre améliore les propriétés mécaniques des composites hybrides de polypropylène renforcé de fibres de jute. Bien que les propriétés mécaniques des composites hybrides soient influencées par les fibres de verre et de jute, les caractéristiques de la fibre de verre telle que l'orientation et la longueur, la rendent plus résistante. Cette étude, également, rejoint la précédente dans le fait que ces caractéristiques, sont les principaux facteurs qui contrôlent les propriétés mécaniques des composites hybrides. Néanmoins, la mauvaise orientation de la fibre de jute et son agrégation a conduit à la réduction des propriétés mécaniques de ces composites hybrides.

Tous ces résultats indiquent que les composites hybrides PP/FV/FJ, moulée par injection, améliorent les performances des composites de fibres naturelles.

Dans une étude ultérieure réalisée en 2020, **TUSNIM et al. [57]** se sont intéressés à la préparation d'un composite hybride renforcé par la fibre de jute (FJ) et de laine (FL) dans une matrice de polypropylène (PP). Dans cette étude, la fibre de jute a été traitée chimiquement avec du NaOH à 5 % et du sel de diazonium dans des milieux alcalins, acides et neutres pour accroître la compatibilité des fibres avec la matrice de PP. Le taux total en fibres de jute et de laine a été fixé à 15 % en poids, avec un rapport de 3:1. Des fibres de jute traitées et non traitées ont été utilisées pendant la préparation du composite. Cinq pour cent du traitement au NaOH a réduit les groupements hydroxyles présents sur la surface de la fibre de jute, tandis que le traitement au sel de diazonium a converti le groupement hydroxyle en groupement diazo.

La caractérisation des composites hybrides PP/ FL/FJ traitée au sel de diazonium dans un milieu neutre présentait de meilleures propriétés mécaniques (module d'Young, résistance en traction, résistance en flexion, dureté), une stabilité thermique et une plus faible absorption d'eau parmi tous les composites préparés.

SUHARA et al. [68, 69] s'est concentré sur l'influence de l'hybridation par les fibres courtes chanvre-verre, sur la capacité d'absorption d'eau des composites hybrides à matrice polypropylène (PP). Les résultats qu'ils ont obtenus ont démontré que l'hybridation chanvre-verre a amélioré de façon significative la résistance à l'absorption d'eau. En effet, l'incorporation de 5% et 15% de fibres de verre a diminué le taux d'absorption d'eau à saturation des composites hybrides d'environ, respectivement, 10% et 40%.

L'effet combiné de l'eau et de la température sur les composites hybrides PP/Bambou-verre a été aussi étudié par **MOE et LIAO [74]**. Ils ont montré que l'hybridation améliore la résistance à l'absorption d'eau du matériau sous l'effet de température.

LE QUAN NGOC TRAN. [81] se sont intéressés au comportement de traction des composites hybrides cette fois-ci structuraux mais toujours à matrice PP renforcée par des fibres de coco-bambou. Les résultats ont montré qu'avec une faible fraction de fibres de bambou, une augmentation de la déformation à la rupture des composites hybrides a été obtenue, ce qui peut être attribué à la déformation élevée des fibres de coco. En contrepartie, les fibres de bambou ont fourni une rigidité et une résistance élevées aux composites hybrides. L'effet hybride positif est obtenu lorsqu'une faible fraction de fibres de bambou est utilisée avec une fraction plus élevée de fibres de coco.

III.2. Composites hybride à matrice époxyde

Plusieurs autres études ont été réalisées par d'autres chercheurs, cette fois-ci, avec des matrices thermodurcissable. Dans ce qui suit, nous allons nous intéresser à quelques-unes.

SCIDA et al. [58] se sont intéressés dans leur travail à l'effet de l'hybridation sur la cinétique de diffusion et sur les propriétés mécaniques des composites hybrides lin-verre. De ce fait, six types de stratifiés non-hybridés et hybridés, composés de 10 couches à renfort sergé de lin, de verre et d'une résine époxyde, ont été mis en œuvre avec différentes séquences d'empilement en utilisant une configuration inter-couche. Ces matériaux ont été

élaborés par thermocompression et soumis à un environnement humide. Les résultats expérimentaux conduisent les auteurs à tirer les conclusions suivantes :

L'hybridation des fibres de lin et de verre associée à une résine époxyde a amélioré la résistance à l'humidité du composite à fibres de lin, en réduisant l'absorption d'eau, le coefficient de diffusion ainsi que le gonflement du composite hybride.

L'hybridation lin-verre a, également, entraîné une augmentation des propriétés mécaniques des matériaux composites tels que le module d'Young (E) et la contrainte en traction (σ), du fait que les fibres de verre sont plus performantes que celles du lin.

En comparaison au composite à fibres de lin, l'hybridation lin-verre a nettement réduit les pertes des propriétés mécaniques des matériaux hybrides après immersion dans l'eau à 20°C. Pour des vieillissements à température plus élevée (à 55°C), l'hybridation lin-verre a présenté des effets négatifs sur la contrainte maximale des composites hybrides. Ceci est dû à la création de contraintes de rétrécissement entre les couches de fibres de lin et de verre liées à la différence des coefficients de dilatation des deux types de fibres.

Une étude sur des matériaux hybrides Époxyde/kénafe-verre pour une utilisation destinée à des pare-chocs de voiture, a été entretenue par **DAVOODI et al. [59]**. L'objectif principal de leur étude était de trouver une alternative au matériau composite à base de mats de verre et d'une matrice thermoplastique. Les auteurs ont montré que l'hybridation a nettement amélioré les propriétés mécaniques en traction (E et σ) par rapport à celles du composite à fibres de verre.

La même démonstration a été reportée par une autre étude effectuée par **ABDUL KHALIL et al. [60]**. Dans cette étude, les auteurs ont évalué les propriétés en traction et au choc de composites hybrides à résine époxyde renforcée par des fibres de palmier et du verre. L'hybridation a été effectuée par ajout des fibres de verre aux fibres de palmier. Celle-ci a grandement contribué à l'amélioration des performances, en traction et au choc, du composite initialement chargé de fibres de palmier. En outre, l'amélioration de la résistance au choc a été plus efficace lorsque les fibres de verre ont été placées à la surface du matériau hybride.

Toujours à base de résine époxyde mais renforcée par un mélange hybride de fibres de lin et de carbone, **VALENZA et al. [65]**, ont investigué les propriétés mécaniques des composites hybrides élaborés. Le carbone a été introduit sous forme de couche de tissu

unidirectionnelle dans le composite à renfort tissé de lin destiné à des applications structurelles. Les auteurs ont observé une amélioration considérable des propriétés mécaniques seulement avec l'ajout d'une seule couche externe de carbone dans le composite hybride. Le module de flexion a augmenté de 221,7% en comparaison avec le composite non-hybridé à fibre de lin. Ils ont suggéré que les composites hybrides ainsi préparés peuvent alors trouver plusieurs applications dans des domaines structurels comme l'aéronautique et l'automobile.

MUSTAPHA et al. [66] se sont intéressés au même composite hybride que précédemment mais avec une architecture différente afin d'évaluer les propriétés dynamiques. Les résultats obtenus étaient en concordance avec la littérature. Les auteurs ont démontré que les composites à fibres de lin possèdent un pouvoir amortissant supérieur à celui du composite non-hybride à fibres de carbone. En plus, les propriétés mécaniques et dynamiques des hybrides obtenus dépendaient de la séquence d'empilement des couches de lin et de carbone. Ceci dit, l'ajout de deux couches de lin de part et d'autre du composite hybride améliore largement son pouvoir amortissant, mais influe négativement sur son module de flexion.

L'influence de l'hybridation sur l'absorption d'eau des composites hybrides bambou-verre/époxy a été étudiée par **PRADEEP et al. [70]**. À partir de cette étude, ils ont constaté que l'augmentation de la teneur en fibres de verre réduit l'absorption d'eau du composite hybride. En effet, les résultats ont permis de conclure que l'hybridation bambou-verre entraîne une diminution de la masse à saturation d'environ 38 % pour les composites hybrides bambou-verre/époxy.

GUTHRIE et al. [72] ont évalué l'effet de l'hybridation des fibres unidirectionnelles de lin avec des fibres de carbone sur l'absorption d'eau, les propriétés mécaniques ainsi que thermiques des composites hybrides. Au bout de 27 jours d'immersion dans l'eau à 23°C, les résultats ont montré que l'hybridation entraîne une diminution de l'absorption d'eau d'environ 85% par rapport au composite à fibre de lin. Les couches de fibres de carbone incorporées de part et d'autre des plis de lin augmentent la résistance à l'absorption d'eau du composite.

Les conclusions émises dans ces travaux précisent que les composites hybrides présentent une meilleure stabilité mécanique et thermique, et ont le potentiel pour réduire l'utilisation des fibres synthétiques comme renforts dans les matériaux composites.

GUPTA. [75] a étudié le comportement dynamique et thermique du composite hybride époxy jute/sisal. Les résultats de cette étude indiquent un effet positif de l'hybridation en termes d'augmentation des propriétés mécaniques et thermiques dynamiques. Le module de stockage, le module de perte et la température de transition vitreuse (T_g) se sont révélés plus élevés pour les composites hybrides ayant un pourcentage plus élevé de fibres de jute.

SAW et al. [77] ont examiné les propriétés mécaniques dynamiques par DMA de différentes architectures de composite hybride à base de résine époxyde et de fibres de bagasse et de coco. Ils ont conclu que le composite hybride à trois couches (bagasse/coco/bagasse) possédait de meilleures propriétés que le composite à deux couches (bagasses/coco).

MATTHEW CHAPMAN et al. [80] ont travaillé sur les propriétés mécaniques (choc à faible vitesse et flexion) des composites hybrides lin-carbone/époxy comparé aux composites non hybridé lin/époxy et carbone/époxy. Cette étude a suggéré clairement que l'hybridation des fibres de carbone sur les composites de lin/époxy peut contribuer à une amélioration significative de la résistance aux chocs, à la flexion et du module des composites. Les composites hybrides présentait des caractéristiques de choc semblables à celles des composites carbone/époxy, mais dépassant de loin les performances des composites lin/époxy. Il a également été démontré que les fibres naturelles telles que le lin ont également amorti la résonance harmonique (the harmonic resonance) au cours de l'essai. Il s'agit d'une réalisation importante pour ce qui est de fournir le potentiel des composites hybrides de fibres naturelles dans des applications semi-structurelles et structurelles légères.

III.3.Composites hybride à matrice polyester

Les travaux de **VIJAYARANGAN et SABEEL AHMED. [61]** ont porté sur l'hybridation par l'empilement des couches des fibres de jute et de verre dans une résine polyester. Les résultats ont permis de démontrer que l'ajout des couches de fibres de verre dans les composites fibres de jute/polyester a amélioré les propriétés en traction, en flexion et en cisaillement. D'autre part, la variation de la séquence d'empilement a montré un effet important sur la contrainte en flexion et en cisaillement des composites hybrides. Le composite hybride composé de deux couches de verre situées de part et d'autre des plis de

jute, a formé la combinaison optimale pour avoir un bon équilibre entre les performances mécaniques et le coût.

Les travaux de **DRUMMOND et al. [62]** se sont intéressés à l'étude du comportement du composite sisal/polyester avec une hybridation en fibres de verre, sous différentes sollicitations. Cette étude a montré que le type de la séquence d'empilement influe sur les propriétés mécaniques des composites hybrides. En outre, l'hybridation sisal-verre a donné des propriétés comparables à celles du composite à fibres de verre, et particulièrement concernant les valeurs du module de flexion et la résistance au choc. Une amélioration du pouvoir amortissant des composites hybrides a été enregistrée avec l'augmentation du taux d'hybridation par la fibre de verre. Cette même constatation a été observée par **DAIANE et al. [67]** lors de l'étude du composite hybride polyester/ramie/verre. Les auteurs ont attribué cela à l'incompatibilité des fibres de ramie et de la matrice qui engendre une dissipation d'énergie à l'interface.

PRADEEP et al. [70] ont réalisé des travaux sur l'effet de l'hybridation par l'ajout des fibres de verre à des composites bambou/polyester. La présence des fibres de verre a induit une diminution de l'absorption d'eau par les composites. Ceci s'exprime par une diminution de la masse à saturation d'environ 51% pour les composites hybrides bambou-verre/polyester.

Des travaux visant à améliorer les performances mécaniques et la résistance à l'absorption d'eau des composites à fibres courtes de banane ont été menés par **ELAYAPERUMAL et al. [71]**. Les composites ont été hybridés par l'ajout de fibres de sisal avec différentes fractions massiques (25, 50 et 75%). L'hybridation des fibres de banane avec celles de sisal a enregistré une amélioration à la fois des performances mécaniques (le module d'Young, la contrainte en traction, en flexion et la résistance au choc) et la résistance à l'absorption d'eau. Les résultats ont montré que l'incorporation de 50 % de fibres de sisal entraîne une augmentation de la résistance à la traction, à la flexion et au choc, respectivement, d'environ 16 %, 4 % et 35 %. En plus, le composite hybride avec 50% de fibres de banane et 50% de sisal, présentait une résistance optimale à l'absorption d'eau parmi les composites hybrides étudiés.

Pour évaluer l'effet de l'hybridation sur la durabilité des composites hybrides, **SANTULLI et al. [73]** ont réalisé une étude sur composites polyester/jute-verre. Les matériaux hybrides ont été soumis à un vieillissement hydrothermique par immersion dans l'eau à 23,

50 et 80 °C. Les résultats ont montré que le composite non-hybride jute/polyester immergé à 23 °C présentait l'absorption d'eau la plus importante (47%), ceci est justifié par le caractère hydrophile des fibres de jute. Lorsque le composite a été hybridé par l'ajout des fibres de verre, son absorption d'eau a été nettement réduite. Ceci s'explique par le fait que les couches de verre ont assuré une protection des fibres de jute, réduisant ainsi l'absorption d'eau dans les composites hybrides.

En outre, les composites hybrides ont enregistré une diminution négligeable de la contrainte et du module en comparaison avec le composite non-hybride vieilli. Cette étude a également souligné l'avantage de l'hybridation des fibres naturelles avec des fibres synthétiques dans la prolongation de la durée de vie des composites à fibres naturelles. Cette hybridation a permis d'établir un équilibre entre les performances mécaniques et le coût de revient, tout en veillant à l'aspect respectueux de l'environnement du composite.

SHANMUGAM et THIRUCHITRAMBALAM. [76] ont travaillé sur les composites hybrides fibres des feuilles de palmier-jute/polyester. Ils ont indiqué que l'hybridation par les fibres de jute augmentait la résistance à la traction et à la flexion de, respectivement, 46 % et 56 %. Les travaux ont indiqué que la présence de la fibre de jute améliorerait le module de stockage et le module de perte.

POTHAN et al. [78] ont travaillé sur les propriétés dynamique mécanique des composites hybrides banane/verre et des composites renforcés à la fibre de banane seule. Les travaux ont permis de conclure que l'hybridation de la fibre de banane avec la fibre de verre a été prouvé pour améliorer la performance mécanique et le comportement d'absorption d'eau des composites.

III.4. Composites hybride à matrice phénolique

Une étude menée par **YONGLI et al. [63]** a été réalisée en trois parties en tenant compte de:

- i) l'influence de la variation de la fraction volumique en renfort unidirectionnel par des fibres de verre sur les propriétés du composite hybride lin-verre/résine phénolique.
- ii) l'influence de la séquence d'empilement entre les couches de fibres de lin et les couches de fibres de verre.

iii) l'utilisation d'un modèle basé sur la loi des mélanges, afin de prédire les propriétés en traction des composites hybrides.

Les auteurs ont constaté que le composite à fibres de lin présentait des propriétés mécaniques faibles en comparaison à celles du composite à fibres de verre (figure III.1. a). Ceci est dû au fait que les fibres de lin et les fibres de verre montrent des allongements différents. Et il a été constaté que le matériau subit deux types de ruptures. Les auteurs ont également remarqué que l'allongement à la rupture du matériau correspond à celui des fibres de lin lorsque le taux de celles-ci est majoritaire. Par contre, si la fraction volumique des fibres de verre est plus importante, les couches à fibres de lin se rompent en premier et le composite hybride atteint la rupture finale pour un allongement à la rupture égal à celui du composite à fibres de verre. L'allongement à la rupture des composites hybrides est une fonction linéaire de la fraction volumique des fibres de verre (figure III.1. b). Ils ont aussi observé que les propriétés mécaniques des composites hybrides (et plus particulièrement le module d'Young) ont été améliorées avec l'augmentation de la fraction volumique des fibres de verre (figure.III.2). D'autres résultats ont également permis de noter que la position des couches de fibres de verre influe fortement la résistance à la traction de tous les composites hybrides, à l'exception du module d'Young, qui reste quasiment constant.

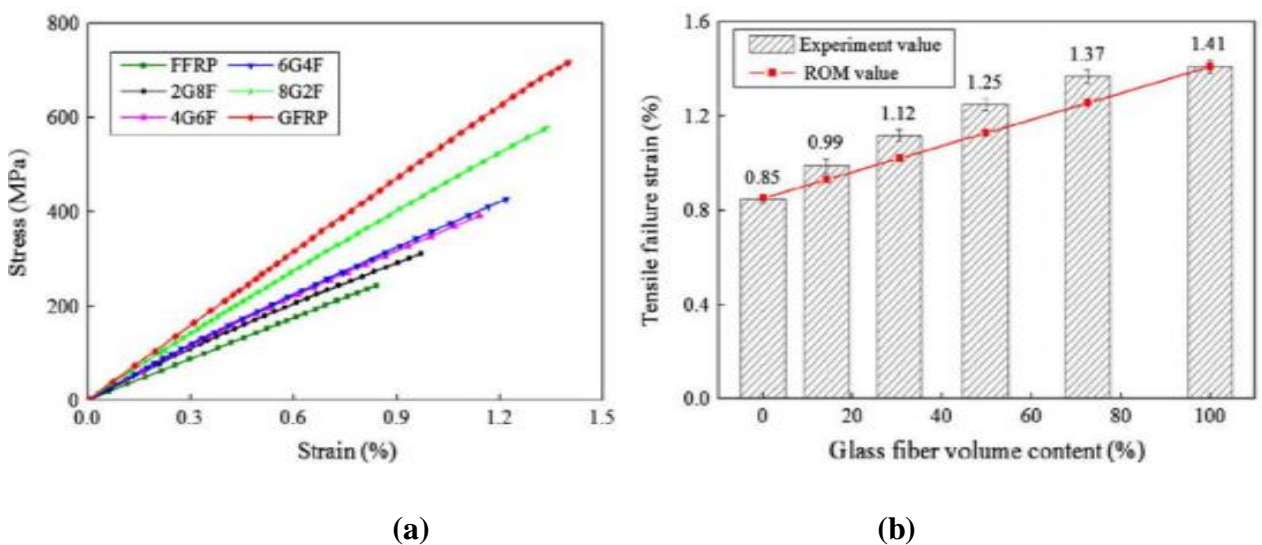


Figure III.1. Composite hybride avec différentes séquences d'empilement : a) courbes contrainte-déformation, b) déformation à la rupture (avec F : fibres de lin, G : fibres de verre, ROM : loi des mélanges, le numéro indique le nombre de couches). [63]

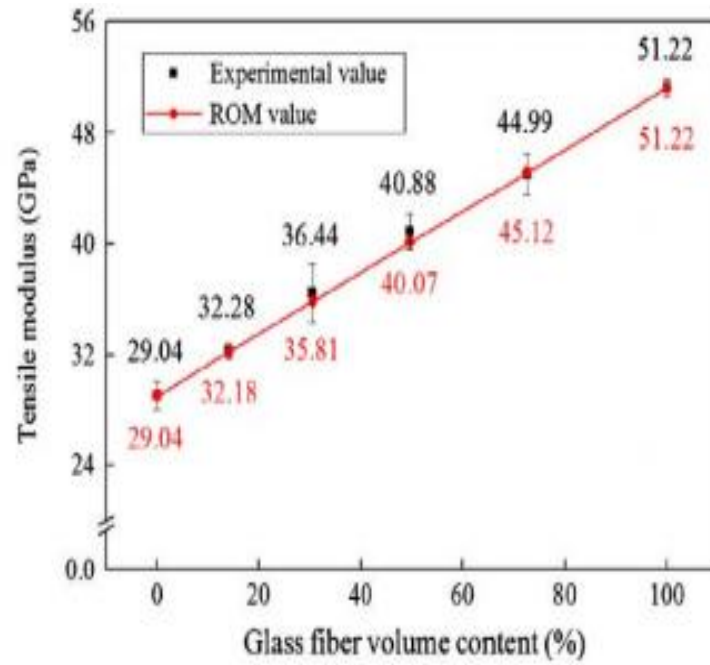


Figure III.2. Évolution du module d'un composite hybride en fonction de la fraction volumique des fibres de verre. [63]

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Dans ce travail, nous nous sommes intéressés à une recherche bibliographique sur les composites hybrides à matrice polymère et le renfort est un assemblage de deux fibres ou charges ou encore d'une charge et de fibre, l'une d'elles est d'origine végétales.

Une caractérisation des propriétés mécaniques en traction, flexion, ainsi que la résistance au choc et l'absorption d'eau, ont été effectuée, par les auteurs. En plus de ça, le suivi de la stabilité thermique, des propriétés d'amortissement ainsi que la durabilité de certains composites hybrides a été réalisé par certains auteurs afin élucider le pouvoir d'hybridation sur le comportement de ces composites structurés ou non.

L'ensemble des résultats a montré que:

- Les propriétés mécaniques telles que le module d'Young, la résistance en traction, la résistance en flexion, la résistance au choc et la dureté des composites hybrides sont améliorés pour les différents systèmes étudiés, en particulier, pour l'hybridation avec des fibres inorganiques. Pour les fibres naturelles, il existe un rapport optimal dépendant de la composition de ces fibres.
- Les fibres naturelles (animale et végétale) et inorganiques (Fibre de verre) ayant une stabilité thermique élevée, ont contribué efficacement à l'amélioration de la stabilité thermique des composites hybrides concernés.
- l'hybridation a amélioré la résistance à l'absorption d'eau de tous les systèmes composites hybrides étudiés, et certain d'eux même après exposition au vieillissement hydrothermique à hautes températures (50, 80 °C).
- L'hybridation a contribué à la réduction du coût du matériau final lors de la substitution des fibres synthétiques par les fibres végétales. Par contre, l'hybridation des fibres naturelles avec des fibres synthétiques améliore les performances et prolonge la durée de vie des composites à fibres naturelles. Cette hybridation a permis d'établir un équilibre entre les performances mécaniques et le coût de revient, tout en veillant à l'aspect respectueux de l'environnement du composite.
- De meilleures performances sont aussi obtenues, pour les composites hybrides structurés, et ceci dépendamment, de l'orientation, la longueur et le taux des fibres ainsi que l'empilement et l'architecture des renforts.

L'hybridation des matériaux composites est l'un des moyens permettant l'adaptation des propriétés composites en fonction de la structure désirée tout en optimisant le rapport coût/performance et respect de l'environnement.

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

- [1] CALABRESE, LUIGI, et al. "Pinned hybrid glass-flax composite laminates aged in salt-fog environment: Mechanical durability." *Polymers* (2020).
- [2] JACQUINET.P, «Utilisation des matériaux composites».Paris,Hermès, pagination multiple,(1991).
- [3] ZAPATA MASSOT, Céline. «Synthèse de matériaux composites par co-broyage en voie sèche. Caractérisation des propriétés physico-chimiques et d'usages des matériaux». Diss,(2004).
- [4] NAGAVALLY, RAHUL REDDY. «Composite materials-history, types, fabrication techniques, advantages, and applications» *Int J Mech Prod Eng* 5.9, (2017).
- [5] BERRO RAMÍREZ, JUAN PEDRO. «Caractérisation et modélisation de l'endommagement des composites bobinés. Application à la prédiction de l'éclatement des réservoirs bobinés hyperbares.» Diss. Chasseneuil-du-Poitou, Ecole nationale supérieure de mécanique et d'aérotechnique,(2013).
- [6] COUSINS, DYLAN S., et al. "Recycling glass fiber thermoplastic composites from wind turbine blades." *Journal of cleaner production* 209 (2019).
- [7] KHAN, AJMIR, NAVEED AHMED, and MUHAMMAD RABNAWAZ. "Covalent Adaptable Network and Self-Healing Materials: Current Trends and Future Prospects in Sustainability." *Polymers* 12.9 (2020).
- [8] LEE, MIN WOOK. "Prospects and future directions of self-healing fiber-reinforced composite materials." *Polymers* 12.2 (2020).
- [9] « Overview of the Global Composites Market in 2019-2024 ». Cette étude aurait dû être présentée au JEC World, salon dédié aux matériaux composites,(2020).
- [10] SEYNI ABDOULAYE, «Propriétés physico-chimiques et d'usage de matériaux composites à charge dégradable produits par cobroyage », thèse de doctorat, Université de Toulouse,(2008).
- [11] « Un moyeu de rotor d'hélicoptère en fibre de verre coûte deux fois moins cher que la même pièce construite en acier », Barthias Claude, *Les Matériaux composites*, Dunod, (2020).

- [12] PONTOREAU, MAËL.« Fabrication de matériaux composites innovants base argent renforcés par des nanotubes de carbone par différents procédés de mise en forme ». Diss. Bordeaux, (2020).
- [13] SHEN, ZHENGYAN.« Elaboration, caractérisation et nouvelle architecture de matériaux composites Al/plaquettes de carbone pour des applications thermiques ». Diss. Bordeaux, (2020).
- [14] RINGUETTE, BENOÎT.« Matériaux composites à base de fibres de chanvre ». (2011).
- [15] ROKBI, MANSOUR.« Comportement à la rupture et caractérisation mécanique de composites polyester fibres de verre ». Diss. Université de M'Sila-Mohamed Boudiaf, (2001).
- [16] DANIEL GAY, « Matériaux Composites 4^{ème} Edition », Hermès, (2009).
- [17] MIAH, MOHAMMAD JULHASH, MUBARAK A. KHAN, and RUHUL A. KHAN.« Fabrication and characterization of jute fiber reinforced low density polyethylene based composites: effects of chemical treatment ». Journal of Scientific Research 3.2 (2011).
- [18] RAGOUBI, MOHAMED,«Contribution à l'amélioration de la compatibilité interfaciale fibres naturelles / matrice thermoplastique via un traitement sous décharge couronne», thèse de doctorat, Université Henri Poincaré Nancy I, (2010).
- [19] AGGARWAL, PANKAJ K. "Influence of maleated polystyrene on the mechanical properties of bio-based fibers-polystyrene composites." Journal of the Indian Academy of Wood Science 8.2, (2011).
- [20] BERTHELOT, JEAN.M.« Matériaux composites: comportement mécanique et analyse des structures». Editions Tec & Doc,(2005).
- [21] LERTWIMOLNUN M.W, «Réalisation de nanocomposites PP/Argile par extrusion Bivis.», Thèse Doctorat. Paris : École Nationale Supérieure des Mines de Paris, (2006).
- [22] ZAPATA.MASSOT, CÉLINE. «Synthèse de matériaux composites par co-broyage en voie sèche. Caractérisation des propriétés physico-chimiques et d'usages des matériaux». Diss.(2004).

- [23] LEDRU YOHANN, « Etude de la porosité dans les matériaux composites stratifiés aéronautiques », thèse de doctorat, Université de Toulouse, (2009).
- [24] COULIBALY MAMADOU, « Modélisation micromécanique et caractérisation expérimentale du comportement des matériaux hétérogènes élastoviscoplastiques. Application à la valorisation des polymères recyclés », thèse de doctorat, Université Paul Verlaine de Metz (2008).
- [25] GOUANVÉ, F., MARAIS, S., METAYER, M., et al. « Modélisation micromécanique et caractérisation expérimentale du comportement des matériaux hétérogènes élastoviscoplastiques. Application à la valorisation des polymères recyclés », thèse de doctorat, Université Paul Verlaine de Metz (2008).
- [26] MUSTAPHA MALHA, « Mise en œuvre, caractérisation et modélisation de matériaux composites : polymère thermoplastique renforcé par des fibres de Doum », Université Mohammed V. AGDAL, (2013).
- [27] BOUARISSA .A , « Comportement mécanique d'un matériau fibre jute/époxy : Élaboration et caractérisation », mémoire de master, université de Boumerdes. (2013).
- [28] ZAPATA MASSOT CÉLINE, « synthèse de matériaux composite par Co-broyage en voie sèche et caractérisation des propriétés physico-chimique et d'usage des matériaux », institut national polytechnique de Toulouse, (2004).
- [29] FONTANA, LAURE, et al. "Exploitation des ressources et territoire dans le Massif central français au Paléolithique supérieur: approche méthodologique et hypothèses." (2009).
- [30] TOSSOU, ERIC. "Développement de nouveaux composites hybrides renforcés par des fibres de carbone et de lin: mise en oeuvre et caractérisation mécanique". Diss. Normandie Université, (2019).
- [31] AGREBI, FATMA. Étude des propriétés diélectriques, thermiques et vibrationnelles de matériaux nano-composites à base du caoutchouc naturel renforcés par des nano-renforts cellulosiques. Diss. Amiens, (2018).
- [32] KALIA, SUSHEEL, B. S. KAITH, and INDERJEET KAUR. "Pretreatments of natural fibers and their application as reinforcing material in polymer composites— a". Polymer Engineering & Science 49.7, (2009).

- [33] ELDER, T., D. N. S. HON, and N. SHIRAISHI. "Wood and Cellulosic Chemistry." Marcel Dekker, New York and Basel (1991).
- [34] ALARCÓN.GUTIÉRREZ, ENRIQUE.«Influence de facteurs abiotiques sur la régulation des paramètres microbiens impliqués dans la dégradation de la matière organique d'une litière forestière méditerranéenne». Diss. Aix.Marseille 3, (2007).
- [35] TJEERDSMA, B. F., et al. "Characterisation of thermally modified wood: molecular reasons for wood performance improvement." *Holz als Roh-und Werkstoff* 56.3 (1998).
- [36] SUMMERSCALES, JOHN, et al. "A review of bast fibres and their composites. Part 1–Fibres as reinforcements." *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 41.10 (2010).
- [37] TAJ, SAIRA, MUNAWAR ALI MUNAWAR, and SHAFIULLAH KHAN. "Natural fiber-reinforced polymer composites." *Proceedings-Pakistan Academy of Sciences* 44.2 (2007).
- [38] KLASON, C., J. KUBAT, and H-E. STRÖMVALL. "The efficiency of cellulosic fillers in common thermoplastics. Part 1. Filling without processing aids or coupling agents." *International journal of polymeric materials* 10.3 (1984).
- [39] RAJ, R. G., et al. "Compounding of cellulose fibers with polypropylene: Effect of fiber treatment on dispersion in the polymer matirx." *Journal of applied polymer science* 38.11 (1989).
- [40] LU, ZIQIANG. *Chemical coupling in wood-polymer composites*. Louisiana State University and Agricultural & Mechanical College, (2003).
- [41] WEISS, JEAN, CLAUDE BORD, and Centre technique des industries mécaniques (Senlis). *Les matériaux composites*. CEP, (1983).
- [42] ROBIN, J_J, and Y. BRETON. "Reinforcement of recycled polyethylene with wood fibers heat treated." *Journal of reinforced plastics and composites* 20.14-15 (2001).
- [43] RAZI, P. S., R. PORTIER, and A. RAMAN. "Studies on polymer-wood interface bonding: effect of coupling agents and surface modification." *Journal of Composite materials* 33.12 (1999).

- [44] GATENHOLM.P, FELIX.J, STRÖMVALL.H."Proc of the 1st Wood Fiber-Plastic Composite ".Conférence in Madison , WI, (1993).
- [45] KLASON, C., J. KUBAT, and H-E. STRÖMVALL. "The efficiency of cellulosic fillers in common thermoplastics. Part 1. Filling without processing aids or coupling agents." International journal of polymeric materials 10.3 (1984).
- [46] SHALER, S. M., L. H. GROOM, and L. MOTT. "Microscopic analysis of wood fibers using ESEM and confocal microscopy." Proceeding of the woodfiber plastic composites 25 (1996).
- [47] STARK. N.M, SANADI. A.R, "Effects of fiber type on the properties of wood-plastic composites. Progress in wood fibre-plastic composites conference" , May 25-26, Toronto, Ontario Canada. Materials and Manufacturing Ontario, (2000).
- [48] SANADI, ANAND R., et al. "Renewable agricultural fibers as reinforcing fillers in plastics: Mechanical properties of kenaf fiber-polypropylene composites." Industrial & Engineering Chemistry Research 34.5 (1995).
- [49] PANAITESCU.D. M et al."L'effet de l'interface dans les composites de fibres naturelles et de matières plastiques." Rev. Roum. Chim 52.4 (2007).
- [50] BOUDENNE, ABDERRAHIM. Etude expérimentale et théorique des propriétés thermophysiques de matériaux composites à matrice polymère. Diss. Paris 12, (2003).
- [51] SANADI, ANAND R., D. F. CALUFIELD, and ROGER M. ROWELL. "Reinforcing polypropylene with natural fibers." *Plastics Engineering(USA)* 50.4 (1994).
- [52] SAMAL, SUSHANTA K., SMITA MOHANTY, and SANJAY K. NAYAK. "Polypropylene—bamboo/glass fiber hybrid composites: fabrication and analysis of mechanical, morphological, thermal, and dynamic mechanical behavior." *Journal of Reinforced Plastics and Composites* 28.22 (2009).
- [53] BENSALAH, HALA, et al. "Mechanical, thermal, and rheological properties of polypropylene hybrid composites based clay and graphite." *Journal of Composite Materials* 51.25 (2017).
- [54] TUSNIM, J., N. S. JENIFAR, and M. HASAN. "Properties of jute and sheep wool fiber reinforced hybrid polypropylene composites." *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Vol. 438. No. 1. IOP Publishing, (2018).

- [55] GUNTURU, BUJJIBABU, et al. "Investigation on Mechanical, Thermal and Water Absorption Properties of Banana/Coir Reinforced Polypropylene Hybrid Composites." *Revue des Composites et des Matériaux Avancés* 30 (2020).
- [56] UAWONGSUWAN, PUTINUN, YUQIU YANG, and HIROYUKI HAMADA. "Long jute fiber- reinforced polypropylene composite: Effects of jute fiber bundle and glass fiber hybridization." *Journal of Applied Polymer Science* 132.15 (2015).
- [57] TUSNIM, JARIN, NAWSHIN SULTANA JENIFAR, and MAHBUB HASAN. "Effect of chemical treatment of jute fiber on thermo-mechanical properties of jute and sheep wool fiber reinforced hybrid polypropylene composites." *Journal of Thermoplastic Composite Materials* (2020).
- [58] EL HADI, SAIDANE, SCIDA, DANIEL, ASSARAR, MUSTAPHA, et al. "Composite hybride lin-verre: effet de l'hybridation sur la cinétique de diffusion et les propriétés mécaniques en traction." *Journées Nationales sur les Composites* (2017).
- [59] SAPUAN, DAVOODI, M. M., S. M., AHMAD, DESA, et al. "Mechanical properties of hybrid kenaf/glass reinforced epoxy composite for passenger car bumper beam." *Materials & Design* 31.10 (2010).
- [60] HARIHARAN, ABU BAKAR A. ET KHALIL, HPS ABDUL. "Lignocellulose-based hybrid bilayer laminate composite: Part I-Studies on tensile and impact behavior of oil palm fiber-glass fiber-reinforced epoxy resin." *Journal of Composite Materials* 39.8 (2005).
- [61] AHMED, K. SABEEL, and S. VIJAYARANGAN. "Tensile, flexural and interlaminar shear properties of woven jute and jute-glass fabric reinforced polyester composites." *Journal of materials processing technology* 207.1-3 (2008).
- [62] AMICO, S. C., C. C. ANGRIZANI, and M. L. DRUMMOND. "Influence of the stacking sequence on the mechanical properties of glass/sisal hybrid composites." *Journal of Reinforced Plastics and Composites* 29.2 (2010).
- [63] YONGLI, ZHANG, et al. "Tensile and interfacial properties of unidirectional flax/glass fiber reinforced hybrid composites." *Composites Science and Technology* 88 (2013).

- [64] ANSHIDA,HANEEFA,et al. "Studies on tensile and flexural properties of short banana/glass hybrid fiber reinforced polystyrene composites." *Journal of composite materials* 42.15 (2008).
- [65] FIORE, V., A. VALENZA, and G. DI BELLA. "Mechanical behavior of carbon/flax hybrid composites for structural applications." *Journal of Composite Materials* 46.17 (2012).
- [66] MUSTAPHA,ASSARAR,et al. "Evaluation of the damping of hybrid carbon–flax reinforced composites." *Composite Structures* 132 (2015).
- [67] DAIANE,ROMANZINI,et al. "Influence of fiber hybridization on the dynamic mechanical properties of glass/ramie fiber-reinforced polyester composites." *Journal of Reinforced Plastics and Composites* 31.23 (2012).
- [68] SUHARA,PANTHAPULAKKAL,and MOHINI SAIN. "Injection- molded short hemp fiber/glass fiber- reinforced polypropylene hybrid composites—Mechanical, water absorption and thermal properties." *Journal of applied polymer science* 103.4 (2007).
- [69] SUHARA,PANTHAPULAKKAL,and MOHINI SAIN. "Studies on the water absorption properties of short hemp—glass fiber hybrid polypropylene composites." *Journal of Composite Materials* 41.15 (2007).
- [70] PRADEEP K.,KUSHWAHA,and RAKESH KUMAR. "The studies on performance of epoxy and polyester-based composites reinforced with bamboo and glass fibers." *Journal of Reinforced Plastics and Composites* 29.13 (2010).
- [71] ELAYAPERUMAL,VENKATESHWARAN, N.,A., ALAVUDEEN, A., et al."Mechanical and water absorption behaviour of banana/sisal reinforced hybrid composites." *Materials & Design* 32.7 (2011).
- [72] GUTHRIE,DHAKAL, H. N., ZHANG, Z. Y.,R., et al. "Development of flax/carbon fibre hybrid composites for enhanced properties." *Carbohydrate polymers* 96.1 (2013).
- [73] SANTULLI,AKIL, HAZIZAN MD,SARASINI, FABRIZIO, et al."Environmental effects on the mechanical behaviour of pultruded jute/glass fibre-reinforced polyester hybrid composites." *Composites Science and Technology* 94 (2014).
- [74] THWE, MOE MOE, and KIN LIAO. "Durability of bamboo-glass fiber reinforced polymer matrix hybrid composites." *Composites science and technology* 63.3-4 (2003).

- [75] GUPTA, M. K. "Thermal and dynamic mechanical analysis of hybrid jute/sisal fibre reinforced epoxy composite." Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications 232.9 (2018).
- [76] SHANMUGAM, D., and M. THIRUCHITRAMBALAM. "Static and dynamic mechanical properties of alkali treated unidirectional continuous Palmyra Palm Leaf Stalk Fiber/jute fiber reinforced hybrid polyester composites." Materials & Design 50 (2013).
- [77] SAW, SUDHIR KUMAR, GAUTAM SARKHEL, and ARUP CHOUDHURY. "Dynamic mechanical analysis of randomly oriented short bagasse/coir hybrid fibre-reinforced epoxy novolac composites." Fibers and Polymers 12.4 (2011).
- [78] POTHAN, LALY A., et al. "Dynamic mechanical and dielectric behavior of banana-glass hybrid fiber reinforced polyester composites." Journal of Reinforced Plastics and Composites 29.8 (2010).
- [79] SHARBA, MOHAIMAN JAFFAR, et al. "Effects of kenaf fiber orientation on mechanical properties and fatigue life of glass/kenaf hybrid composites." BioResources 11.1 (2016).
- [80] CHAPMAN, MATTHEW, and HOM NATH DHAKAL. "Effects of hybridisation on the low velocity falling weight impact and flexural properties of flax-carbon/epoxy hybrid composites." Fibers 7.11 (2019).
- [81] TRAN, LE QUAN NGOC, et al. "Tensile behavior of unidirectional bamboo/coir fiber hybrid composites." Fibers 7.7 (2019).