



République algérienne démocratique et populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la
Recherche Scientifique
Ecole Normale Supérieure de l'Enseignement
Technologique-Skikda



Département de Technologie
Filière : Génie Mécanique

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme d'enseignement du secondaire

Option

Génie mécanique

Thème

Elaboration et caractérisation mécanique d'un composite hybride à matrice polymère.

Présenté par :
Lezghed Hadjer

Mahelaine Malak

Sous la direction du Dr. Saaidia Aziz

Jury de Soutenance :

Nom et prénom	Grade	Etablissement	Rôle
Issasfa brahim	MCB	ENSET- Skikda	Président
Laadaci Nouri	MCB	ENSET- Skikda	Examineur
Saaidia Aziz	MCA	ENSET- Skikda	Encadreur

Année Universitaire: 2023/2024

Remerciements

*En rendant grâce à Dieu le Tout Puissant et
Miséricordieux,*

*nous souhaitons exprimer notre profonde gratitude
envers le Dr. SAAIDIA Azíz, notre encadreur, pour son
aide précieuse et sa patience dans la réalisation de ce
travail.*

*Nous exprimons également notre gratitude envers les
membres du jury qui ont accepté de jurer notre mémoire :
le Dr. Issasfa brahím et le Dr. Laadací Nourí.*

*Nous remercions également toutes les personnes qui ont
contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.*

Dédicace

Je dédie ce travail à :

*Mes chers parents et je les remercie sincèrement d'avoir toujours
été là pour moi.*

Mes frères ,

Et à notre petit « zin eddîne », qui a apporté du bonheur chez nous

Et Tous ceux qui me sont chers.

Lezghed Hadjer

Dédicaces

A ma chère mère,

A mon cher père,

A mon seul frère « zin eddine »

A mes chères sœurs « khawla ,khadidja ,dhikra »

A toute ma famille,

A tous mes amis et spécialement « Guiassa Chahra Zed »

Je dédie ce modeste travail.

Mahelaine malak

Introduction générale

Chapitre I : Synthèse bibliographique

I.1. Introduction.	1
I.2. Les matériaux composites en générales.	1
I.2.1. Historique.	1
I.2.2. Définition d'un matériau composites.	2
I.2.3. Les composants de base du matériau composite.	3
I.2.3.1. Les Renfort.	4
I.2.3.2. Les matrices.	5
I.3. Les matériaux biocomposites.	7
I.3.1. Les fibres naturelles.	7
I.4. Définition de fibre végétale.	8
I.4.1. Classification des Fibres Végétales.	9
I.4.2. Morphologie de la fibre végétale.	11
I.4.3. Fibres végétales et caractéristiques mécaniques.	12
I.4.4. Structure interne des fibres végétales.	13
I.4.5. Composition chimique des fibres végétales.	14
I.5. Technique d'obtention des fibres végétales.	18
I.5.1. Le rouissage.	18

Sommaire

I.5.2. L'extraction des fibres.	19
I.5.2.1. L'extraction traditionnelle des fibres végétales.	20
I.5.2.2. L'extraction chimique des fibres végétales	20
I.5.2.3. L'extraction biologique.	21
I.5.2.4. L'extraction mécanique.	21
I.6. Techniques de mise en œuvre des matériaux composites	22
I.6.1. Moulage au contact.	23
I.6.2. Moulage par projection simultanée.	24
I.6.3. Moulage sous vide.	24
I.6.4. Moulage par injection de résine ou RTM.	25
I.6.5. Moulage par compression.	25
I.7. Techniques de mise en œuvre des matériaux biocomposites.	26
I.8. Avantages et inconvénients des fibres végétales.	26
I.9. Applications des matériaux biocomposites.	28
I.10. Conclusion.	30
 CHAPITRE II : Étude expérimentale.	
II.1. Introduction.	31
II.2. Présentation des fibres utilisées.	31
II.2.1. Fibre de lin.	31
II.2.2. Fibre de cactus.	32

II.3. Extraction des fibres de lin et de cactus.	32
II.3.1. Extraction des fibres de lin.	32
II.3.2. Extraction des fibres de cactus.	33
II.4. Matrice.	34
II.5. Elaboration du matériau de l'étude.	35
II.5.1. Préparation du renfort.	35
II.5.2. Elaboration des plaques bio composites.	36
II.5.3. Préparation des échantillons.	38
II.6. Caractérisation mécanique en traction.	39
II.6.1. Essai de traction sur un fil.	40
II.6.2. Essai de traction statique sur le renfort en cactus et sur les bio composites.	41
II.7. Conclusion.	42

Chapitre III : Interprétation des résultats.

III.1. Introduction.	43
III.2. Résultats et discussions des essais.	43
III.2.1. Essais de traction sur le fil de lin.	43
III.2.2. Essais de traction sur la fibre de cactus.	44
III.2.3. Essais de traction sur la résine époxy.	46
III.2.4. Essais de traction sur le matériau composite.	48

III.3. Conclusion.

50

Conclusion générale.

Références bibliographique.

Chapitre I

Figure.I.1 : représentation schématique de divers matériaux composites.	3
Figure.I.2 : schéma des composants des matériaux composites.	4
Figure.I.3 : les différents types de fibres végétales, (A) la fibre de sissal (B) la fibre de ramie, (C) la fibre de bambou .	9
Figure.I.4 : Classification des Fibres Végétales.	10
Figure.I.5 : Représentation schématique de la paroi cellulaire.	14
Figure.I.6 : Structure de la cullulose.	15
Figure.I.7 : Structure de L'hémicellulose.	16
Figure.I.8 : Structure de lignine.	17
Figure.I.9 : Structure de pectine.	18
Figure.I.10 : Rouissage du lin.	19
Figure.I.11 : Les différentes techniques d'extraction des fibres	20
Figure.I.12 : Différentes techniques de moulage.	23
Figure.I.13 : Principe du moulage au contact.	23
Figure.I.14 : Principe du moulage par projection simultanée.	24
Figure.I.15 : Méthode du moulage sous vide.	25
Figure.I.16 : Principe du moulage RTM.	25
Figure.I.17 : Méthode de moulage par compression.	26

Figure.I.18 : Différents domaines d'application des matériaux biocomposites. 29

Figure.I.19 : Utilisation des fibres naturelles avec des bio composites. 30

Chapitre II

Figure.II.1 : La plante de lin. 31

Figure.II.2 : La plante de cactus. 32

Figure.II.3 : Fibre de lin. 33

Figure.II.4 : Fibre de cactus. 34

Figure.II.5 : **A)** Résine et **B)** Durcisseur. 35

Figure.II.6 : Renfort de cactus. 35

Figure.II.7 : Processus de collage des fibres de lin. 36

Figure.II.8 : Elaboration d'une plaque de résine. 37

Figure.II.9 : Elaboration d'une plaque biocomposite. 38

Figure.II.10 : Tronçonneuse à disque en diamant. 38

Figure.II.11 : Eprouvettes utilisées en Traction : Composite, résine et fibre de cactus. 39

Figure.II.12 : Machine universelle de type *test GmbH*, model *112 SKN*. 40

Figure.II.13 : Essai de traction sur les bio composites et le cactus. 42

Chapitre III

Figure.III.1 : Courbe type force-déplacement d'un fil de lin. 43

Figure.III.2 : Courbe type contrainte/déformation d'un fil de lin. 44

Figure.III.3 : Essai de traction sur une éprouvette de cactus. 45

Liste des figures

Figure.III.4 : Courbe contrainte/déformation de la fibre de cactus	46
Figure.III.5 : Essai de traction sur l'éprouvette de résine.	47
Figure.III.6 : Courbe contrainte-déformation de la résine.	47
Figure.III.7 : Essai de traction sur composite lin/cactus/lin	48
Figure.III.8 : Courbe contrainte-déformation du composite lin/cactus/lin.	49

Chapitre I

Tableau.I.1 : Propriétés morphologiques de quelques fibres végétales.	12
Tableau.I.2 : Propriétés mécaniques des quelques fibres végétales.	13
Tableau.I.3 : Composition chimique des fibres végétales.	18
Tableau.I.4 : Quelques machines d'extraction de fibres végétales.	22
Tableau.I.5 : Avantages et inconvénients des fibres naturels.	27

Chapitre III

Tableau III.1 : Propriétés mécaniques en traction des éprouvettes fibres de lin seule.	44
Tableau III.2 : Propriétés mécaniques en traction des éprouvettes fibres de cactus.	46
Tableau III.3 : Propriétés mécaniques moyennes des essais de traction de la résine époxy.	48
Tableau III.4 : Propriétés mécaniques moyennes des essais de traction du matériau biocomposite.	50

Liste des abréviations

ASTM: American Society for Testing and Materials.

E : Le module de Young.

F: La force (N).

GPa : Gega pascal.

l : La valeur obtenue par la machine (mm).

l_0 : La longueur initiale (mm).

mm : Millimetre.

MPa : Mega pascal.

S : La section de l'éprouvette (mm^2).

ε : La déformation.

σ : La contrainte à la rupture.

δ : La valeur obtenue par la machine (mm).

Résumé

Chaque type de fibre a sa propre fonction et est utilisé pour une large gamme de produits. En général, il est important de choisir une fibre en fonction de son usage et des propriétés requises pour le produit ou l'application spécifique. Étant donné que notre objectif était principalement de protéger l'environnement et la nature face à la pollution et aux maladies répandues, et ensuite de bénéficier autant que possible de nouvelles propriétés qui ne sont pas disponibles dans les fibres traditionnelles et largement utilisées (fibres synthétiques), nous avons choisi pour notre étude : la fibre de lin naturelle, et pour la soutenir davantage (en termes de propriétés finales souhaitées), nous avons ajouté la fibre de cactus naturelle et testé nos plaquettes finales avec un test de traction simple pour enregistrer les résultats finaux de l'étude mécanique.

Mots Clés : Fibres végétales, Lin, Cactus, Bio-composites, Traction.

Abstract

Each type of fiber has its own function, and it is used for a wide range of products. In general, it is important to choose a fiber according to its use and the properties required for the specific product or application. Given that our main objective was to protect the environment and nature from widespread pollution and disease, and then to benefit as much as possible from new properties that are not available in traditional and widely used fibers (synthetic fibers), we chose natural flax fiber for our study, and to support it further (in terms of desired final properties), we added natural cactaceae fiber and tested our final wafers with a simple tensile test to record the final results of the mechanical study.

Key words: Plant fibers, Flax, Cactaceae, Bio-composite, Traction.

ملخص

ملخص

كل نوع من الألياف له غرضه ويستخدم لمجموعة واسعة من المنتجات. بشكل عام، من المهم اختيار الألياف بناءً على الغرض منها والخصائص اللازمة للمنتج أو التطبيق المحدد. ولأن تركيزنا كان موجهاً في المقام الأول نحو حماية البيئة والمحيط في ظل التلوث والأمراض المنتشرة وفي المقام الثاني الاستفادة قدر المستطاع من خواص جديدة غير متوفرة في الألياف التقليدية الواسعة الاستعمال (الألياف الصناعية) فكان اختيارنا لدارستنا هو الياف الكتان الطبيعية ولزيادة الخصائص الميكانيكية قمنا ب دعمها ب الياف الصبار واختبرنا قطعنا ب اختبار الشد البسيط لتدوين النتائج النهائية للدراسة الميكانيكية.

الكلمات المفتاحية: ألياف نباتية، الكتان، الصبار، مادة حيوية ، الشد.

Introduction
générale

Introduction générale

L'actuelle prise de conscience des problèmes de pollution et de la nécessité de préserver l'environnement a dirigé l'attention vers l'utilisation de produits biodégradables provenant de sources renouvelables comme les fibres naturelles.

L'industrie automobile est principalement l'industrie qui utilise le plus de fibres végétales comme renforts de polymères, en particulier les équipementiers. Leurs stratégies se concentrent principalement sur le développement durable et la préservation de l'environnement. Grâce à l'emploi de matériaux « verts », ils peuvent fabriquer des véhicules plus respectueux de l'environnement tout en réduisant la masse du matériau, ce qui a un impact sur la consommation de carburant. La plage arrière, les panneaux de porte, les tableaux de bord, les caches de roue de secours sont les principales parties d'un véhicule réalisées à partir de fibres végétales.

L'Algérie compte parmi les pays qui possèdent des ressources exceptionnelles en fibres végétales (palmier, Alfa Abaca, Chanvre, Cotton, grignon d'olive, etc.), mais malheureusement, celle-ci est encore peu utilisée dans les domaines pratiques [1].


L'utilisation des fibres végétales pour renforcer les matériaux est relativement récente par rapport à celle des fibres d'amiante ou d'acier. Pour définir ce nouveau matériau composite, il est donc nécessaire de multiplier les recherches et les essais, ainsi que de développer de nouvelles méthodes d'expérimentation. Ainsi ce travail s'appuie sur une démarche expérimentale de caractérisation du comportement mécanique des composites renforcés par des fibres naturelles d'origine végétale. Parmi ces fibres végétales, le lin et le cactus qui sont des matériaux de renfort prometteurs.

L'objectif principal de ce travail est de valoriser ces fibres qui ont été choisies en tant que matériaux de renfort pour les composites étudiés. Cependant, leur comportement mécanique représente un domaine d'étude à part entière.

Ce travail est subdivisé en trois chapitres articulés de la manière suivante :

Le premier chapitre présente les matériaux composites d'une manière générale et les fibres végétales leur définition, classification et leurs structures, leurs propriétés (chimique et mécanique) et leurs applications.

Dans le deuxième et troisième chapitre nous avons exposé les techniques utilisés dans ce travail et les résultats expérimentaux obtenus par l'essai.



Chapitre I :
synthèse
bibliographique

I.1.Introduction

Historiquement, l'utilisation des végétaux a toujours existé, comme par exemple dans la construction ou le textile. A nos jours, l'intérêt pour les matériaux d'origine agricole a considérablement augmenté dans le domaine des composites en raison de leur respect de l'environnement et c'est pour cette raison que les fibres végétales ont commencé à être utilisées pour produire davantage de matériaux composites.

Dans ce chapitre nous présentons une synthèse bibliographique sur les matériaux composites en général et ensuite sur les fibres naturelles, précisément les fibres végétales, leurs classifications, structures et compositions chimique, propriétés physiques et les différentes techniques d'extraction les fibres végétale et mise en œuvre des matériaux biocomposite et leurs applications.

I.2.LES MATERIAUX COMPOSITES EN GENERAL

I.2.1.Historique

- Premier matériau composite naturel utilisé : bois.
- 9000-7000 avant JC : torchis et briques (argile et fibre végétale).
- 2000 avant JC : arcs mongols (bois contrecollé de tendon et de corne).
- 1823 : Charles Macintosh créé L'imperméable (caoutchouc sur coton).
- 1892 : François Hennebique dépose le brevet du béton armé.
- 1942 :L'US Rubber company invente le premier composite à fibre de verre [2].

Les matériaux composites étaient connus des anciennes civilisations sumérienne et égyptienne qui utilisaient des briques d'argile mélangées à de la paille dans la construction. Cependant, à notre époque, les ingénieurs et les scientifiques ont pu utiliser les matériaux composites dans de nombreuses applications importantes de la vie industrielle au début de l'ère moderne Année 1960.

Les matériaux composites surpassent les matériaux structurels traditionnels dans de nombreux domaines car :

- 1- La durabilité des matériaux composites est bien supérieure à celle des matériaux de structure traditionnels.
- 2- Il résiste à la corrosion et aux changements liés à diverses conditions météorologiques. Réduit la consommation de matières premières et la perte d'énergie.
- 3- Les matériaux composites sont légers sans affecter leurs propriétés de durabilité et sont donc faciles à transporter.
- 4- Haute résistance thermique pour les mélanges céramiques et plus grande résistance thermique pour les mélanges.
- 5- Céramiques et plus grande résistance aux produits chimiques.
- 6- Grande résistance à la propagation des fissures pouvant survenir à la suite des vibrations [3].

1.2.2. définition d'un matériau composite

Matériau composite est une combinaison de deux matériaux naturels différents assemblés entre eux.

Les deux composants distincts sont divergents, mais harmonieux, chacun remplissant un rôle unique et aboutissant à un produit final aux performances impressionnantes.

Les propriétés combinées d'un matériau composite dépassent celles de ses composants. Les matériaux composites étaient connus des anciennes civilisations sumérienne et égyptienne qui utilisaient des briques d'argile mélangées à de la paille dans la construction. Cependant, à notre époque, les ingénieurs et les scientifiques ont pu utiliser les matériaux composites dans de nombreuses applications importantes de la vie industrielle au début de l'ère moderne en l'année 1960. Les matériaux composites surpassent les matériaux structurels traditionnels dans de nombreux domaines car... La durabilité des matériaux composites est bien supérieure à celle des matériaux de structure traditionnels. Il résiste à la corrosion et aux changements liés à diverses conditions météorologiques. Réduit la consommation de matières premières et la perte d'énergie. Les matériaux composites sont légers sans affecter leurs propriétés de durabilité et sont donc faciles à transporter. Haute résistance thermique pour les mélanges céramiques et plus grande rasants individuels. Un matériau composite est alors créé.

Au sens le plus large, on fait référence au scénario d'une ou plusieurs phases fragmentées dispersées dans une autre phase.

L'expression « continuer » est souvent associée à la persévérance et à la persévérance. Dans le contexte de la science des matériaux, il existe une étape appelée renforcement, ou matériau de renforcement, qui se caractérise par une phase qui n'est pas continue.

Les caractéristiques mécaniques de la phase dispersée, également appelée charge, sont généralement plus fortes que celles de la matrice, qui est la phase continue (figure.I.1) [4].

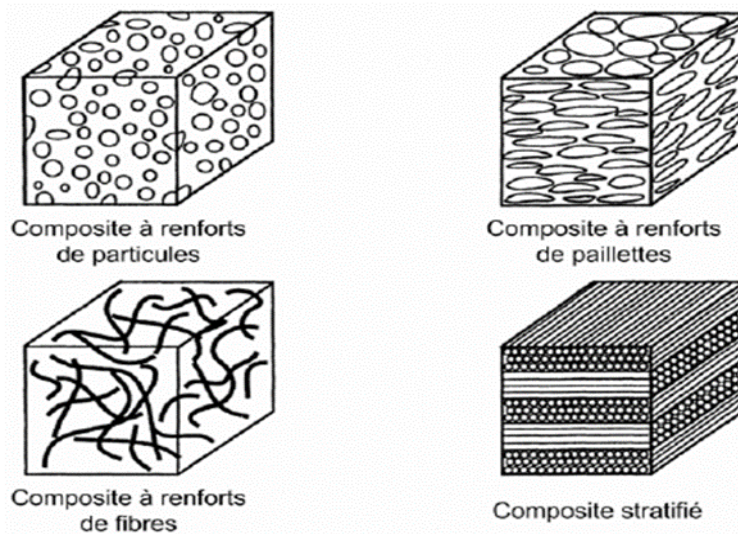


Figure.I.1 : représentation schématique de divers matériaux composites.

Les matériaux composites sont divisés en fibres longues et fibres courtes, chacune étant utilisée selon la nature des propriétés mécaniques recherchées.

I.2.3.les composants de base du matériau composite

On appelle matériau composite tout matériau dans lequel la matrice et le renfort combinés comme le schéma suivant (Figure.I.2) :

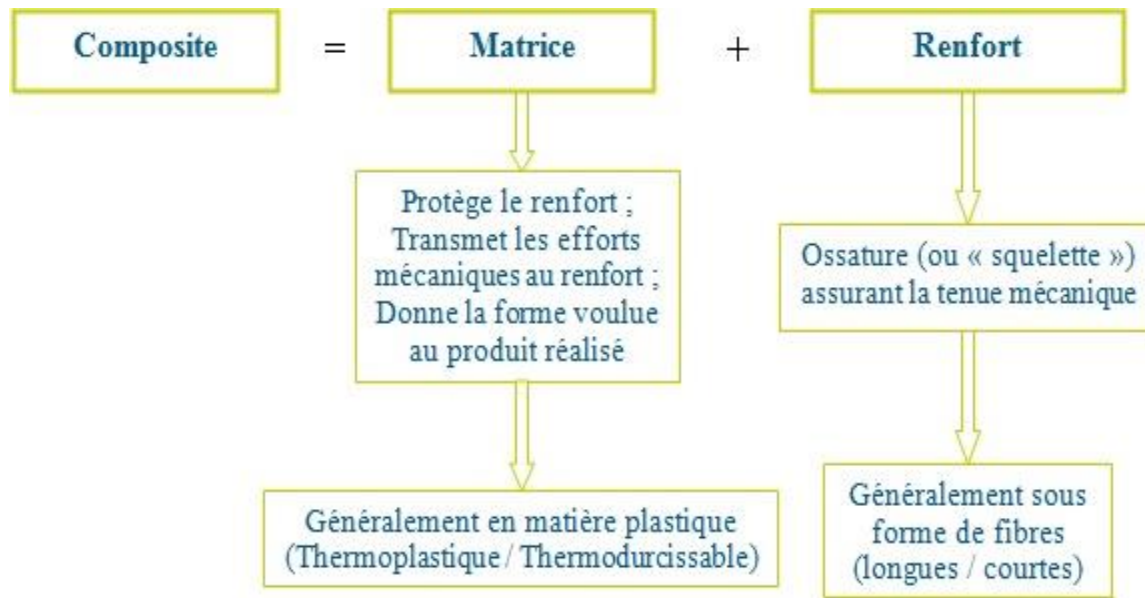


Figure.I.2 : schéma des composants des matériaux composites

I.2.3.1. Les Renfort

- Les supports principal des matériaux composites est le composant de renforcement.
- Les forces mécaniques peuvent se manifester de différentes manières.
- Les particules peuvent se présenter sous diverses formes telles que des microbilles, des fibres broyées, des écailles ou des charges.
- La substance en question est une poudre composée de particules de taille micro ou nano.
- Les fibres courtes sont couramment utilisées comme renforts pour les surfaces non texturées, telles que les tapis.
- Les fibres continues sont fréquemment utilisées comme renforts texturés, notamment dans la création de tissus tels que le taffetas et le sergé.
- Les renforts unidirectionnels peuvent inclure des articles comme des nappes, tandis que les renforts bidirectionnels peuvent être constitués de matériaux comme le satin ou d'autres avec un tissage similaire.
- Les architectures fibreuses peuvent être trouvées dans différentes dimensions, allant de la 2D à la 4D, avec des conceptions complexes et multidirectionnelles.

- La sélection d'un tissu particulier est basée sur sa drapabilité, qui fait référence à sa capacité à fournir une couverture.
- La forme de la pièce est soigneusement choisie pour éviter tout pli, quel que soit son niveau de complexité. De plus, la forme choisie est spécifiquement conçue pour répondre aux spécifications souhaitées.
- Objectif : évaluer les contraintes mécaniques que va rencontrer le composant [5].
- Parmi les fibres les plus employées, on peut citer : Les fibres de verre, Les fibres d'aramide, les fibres végétales et les fibres de carbone.

I.2.3.2. Les matrices

Le but principal de la matrice est de transmettre les efforts mécaniques aux barres d'acier. Elle doit

Assure également la protection des barres d'acier dans diverses conditions environnementales

(Corrosion, oxydation, vieillissement humide, etc.). En ce qui concerne les CMO, il existe de nombreux Les polymères peuvent être utilisés comme matrices. Ces résines synthétiques proviennent Composés obtenus par réticulation de macromolécules (association moléculaire) appelés monomères, sous l'action de la chaleur et/ou de catalyseurs. Trois grandes catégories On peut cependant distinguer ces matières plastiques :

- Polymères thermoplastiques (cristallins, semi-cristallins ou amorphes).
- Polymères thermodurcissables (amorphes).
- Élastomères (amorphes).

- **Les résines thermoplastiques**

Sont des polymères à chaînes linéaires ou ramifiées, c'est-à-dire Unidirectionnel ou bidirectionnel. Ils sont généralement fondants et solubles. Ce L'un des grands avantages des résines thermoplastiques est leur capacité à ramollir alternativement Durcir par chauffage et refroidissement, ce qui facilite le moulage grâce à la viscosité plasticité. Cette transformation est également réversible, permettant de recycler la substance Matériel.

L'utilisation de ces résines se développe fortement Surtout les matrices comme composites « structurels» en résine thermoplastique Pour les composites aérospatiaux on peut citer le polyétherimide (PEI), Sulfure de polyphénylène (PPS), polyétheréthercétone (PEEK), polyéthercétonecétone (PEKK).

- **Les élastomères**

Sont des polymères naturels ou synthétiques dotés de structures particulières Offre une élasticité importante (jusqu'à 500% d'allongement par rapport à la taille originale).

A titre d'exemples on peut citer les élastomères suivants : les silicones élastomères, Polyuréthane, néoprène, latex, etc. Polyuréthane, néoprène, latex, etc.

- **Les résines thermodurcies**

Sont les produits les plus couramment utilisés comme matrices Composites « structurels ». Souvent associés à des fibres longues, ils sont un liquide ou un liquide visqueux et est réticulé par activation thermique Catalyseurs et durcisseurs. Cette transformation est irréversible et aboutit à un produit infusible Et insoluble.

Les principales résines thermodurcissables actuellement utilisées sont :

- ✓ **Résine époxy** : aux bonnes propriétés mécaniques. Ce Résine grade 180°C, réticulée à 180°C, généralement utilisée avec des renforts.
- ✓ **Les résines phénoliques** : sont utilisées dans des applications nécessitant les propriétés suivantes

Résistance au feu spécifiée dans les normes de transport civil. Ceux-ci depuis L'inconvénient d'être éteint est qu'il a une mauvaise résistance à la pression Mécanique.

- ✓ **La résine polyimide** : est également très chère mais possède un excellent Propriétés mécaniques, notamment à haute température.

Bien qu'elles présentent une bonne résistance mécanique, ces résines sont très sensibles aux chocs.

Pour pallier cet inconvénient, leur ténacité peut être augmentée en les mélangeant avant Polymérisation avec des résines thermoplastiques [6].

I.3. Les matériaux biocomposites

Les Biocomposites sont nés du besoin de matériaux compostables après la fin de leur vie utile et respectueux de l'environnement. Ces matériaux sont constitués de fibres naturelles immergées dans des matériaux biopolymères, et c'est tout naturellement que les fibres ont été choisies. Le renfort est réalisé à partir de matériaux d'origine végétale, et ces fibres cellulosiques sont disponibles dans la plupart des pays du monde.

Quelques propriétés des matériaux biocomposites :

- I. Il est combustible après la fin de sa durée de vie prévue.
- II. Isolation thermique et phonique.
- III. La vérité sur le poids.
- IV. Sol relativement bon marché.
- V. Ne rayez pas les outils de production [7].

I.3.1. Les fibres naturelles

Après des décennies de développement de fibres artificielles haute performance comme le carbone, l'aramide, et le verre, les fibres naturelles ont suscité un regain d'intérêt, en particulier en tant que fibre de verre substitut dans l'industrie automobile.

Les avantages des fibres naturelles par rapport aux fibres synthétiques telles que le verre et le carbone sont les suivants : faible coût, faible densité, acceptable propriétés de résistance spécifiques, la facilité de séparation, la séquestration du dioxyde de carbone et biodégradabilité. Les composites à base de fibres naturelles apparaissent aujourd'hui comme une alternative réaliste à la plastiques remplis de bois et renforcés de verre. Les biocomposites respectueux de l'environnement ont le potentiel de être le nouveau matériau du 21ème siècle et être une solution partielle à de nombreux problèmes environnementaux [8].

Définition de la fibre naturelle

Il existe différentes catégories de fibres qui se distinguent en fonction de l'origine de la fibre. Il est possible qu'une fibre naturelle soit d'origine végétale (le coton, le sisal, le lin,) ou animal (la laine, les poils, la soie,) ou minérale (le verre,) .

 les fibres végétales, qui englobent :

- les fibres issues des poils séminaux de gaines (coton kapok).
- les fibres libériennes extraites de tiges de plantes (lin, chanvre, jute, ramie).
- les fibres dures extraites de feuilles (sisal), de troncs (chanvre de manille), d'enveloppes de fruits (noix de coco).
- ✚ Les fibres animales, provenant des poils et des sécrétions (comme la toison animale) et des sécrétions (comme la soie).
- ✚ les fibres minérales (basalte).

En règle générale, l'emploi de fibres naturelles en tant que renfort pour les matériaux composites est légitime en raison de :

- Pour mettre en valeur une ressource locale dans des pays peu industrialisés, les composites à fibres naturelles offrent de nouvelles opportunités pour les produits agricoles.
- Mettre au point des matériaux et des technologies qui tiennent compte des conséquences sur l'organisme. Depuis des millions d'années, les fibres naturelles sont des matériaux de haute qualité qui sont fabriqués et recyclés de manière naturelle sur Terre (matériaux biodégradables et renouvelables par culture). Dans cette optique, il est envisagé de substituer les fibres de verre par des fibres naturelles, non pas pour économiser, mais parce que les matières premières renouvelables offrent des bénéfices écologique [9].

I.4.Définition de fibre végétale

Une fibre végétale est une expansion morte qui est principalement composée de cellulose, d'hémicellulose, de lignine et de pectine. Elle est soit isolée soit regroupée avec d'autres en un faisceau.

Les fibres végétales disponibles actuellement sur le marché sont le coton, le lin, le chanvre, le jute, le coco, la bagasse,... On s'intéressera ici au jute, au coco et au chanvre.

Elles présentent de nombreux intérêts :

- Les propriétés mécaniques des fibres végétales sont très proches de celles des fibres de verre et les propriétés spécifiques rapportées à la densité sont meilleures que celles du verre.
- Les résistances thermiques des matériaux isolants à base de fibres végétales sont très intéressantes.
- Elles sont très peu denses.

On les retrouve dans les opérations de génie écologique pour le paillage et les géotextiles [10] .



(A)

(B)

(C)

Figure.I.3 : les différents types de fibres végétales (A) la fibre de sissal, (B) la fibre de ramie, (C) la fibre de bambou.

I.4.1. Classification des Fibres Végétales

Les fibres végétales sont divisées en quatre groupes en fonction de leur origine (Figure.I.4) :

Les Fibres de Feuilles : Le rejet des plantes monocotylédones est utilisé pour obtenir ces fibres. Les fibres dures et rigides sont fabriquées par chevauchement de paquets le long des feuilles pour les renforcer.

La fibre de sisal, de Henequen et d'abaca sont les types de fibres de feuilles les plus cultivés.

Les Fibres de Tiges : Les tiges des dicotylédones contiennent des fibres de tige. Ils sont chargés de donner aux tiges des plantes une rigidité adéquate. Les fibres de tige sont commercialisées sous forme de sacs de cor et en toute longueur. Par la suite, un processus de défilage les sépare individuellement. Une fois séparées, les fibres sont utilisées dans la fabrication de cordes ou de textiles ou dans le renforcement du ciment et du béton. Les fibres de tige telles que la jute, le lin, la ramie de sunn, kennaf, urena et chanvre.

Les Fibres de Bois : Les fibres de bois sont fabriquées par le broyage d'arbres tels que les bambous ou les roseaux. En général, ils sont courts.

Les Fibres de Surface : des fruits ou des grains est généralement entourée de fibres de surface. Le groupe de fibres le plus important est constitué des fibres de surface des grains. Nous mentionnons le coton et la noix de coco. Les fibres de coco ont amélioré la résistance à la flexion du ciment de fibre [11].

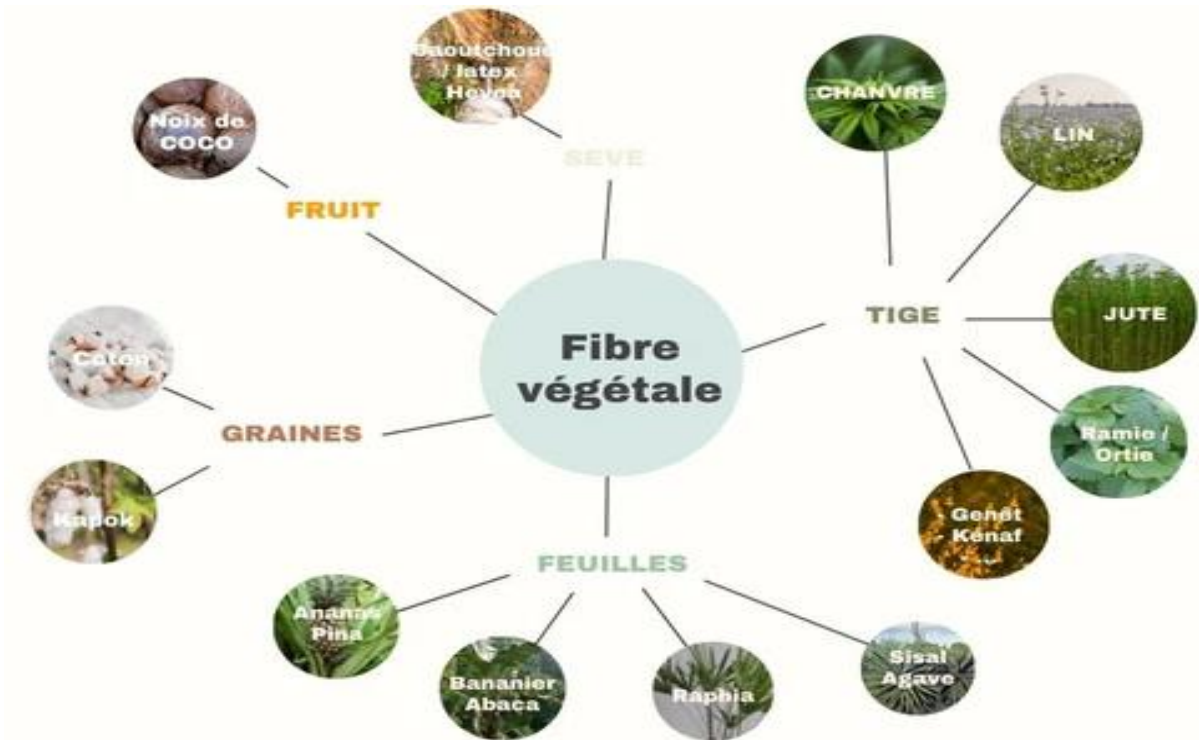


Figure.I.4 : Classification des Fibres Végétales.

I.4.2.Morphologie de la fibre végétale

Étude morphologique

Il existe une solide documentation sur l'impact des dimensions des fibres des matières végétales et de leurs valeurs dérivées, telles que le rapport d'élanement.

D'un point de vue morphologique, la fibre végétale varie considérablement selon leur origine. Effectivement, les dimensions des fibres végétales varient en fonction de l'espèce et au sein de la même espèce, de l'organe de provenance, de l'état de maturité et des conditions environnementales de croissance de la plante. Le diamètre peut varier considérablement le long de la même fibre végétale [12].

- La Morphologie de la fibre végétale a été traitée par beaucoup de chercheurs

Le coefficient de flexibilité et le rapport de Runkel, sur la résistance mécanique des pâtes et du papier. Selon Horn [13] a découvert qu'une longueur plus grande des fibres de la matière première améliore la résistance à la déchirure des pâtes de feuillus. Horn et Setterholm [14] ont également découvert à l'aide d'une analyse de régression multiple que la plupart des variations dans la résistance à l'éclatement et à la traction des feuilles de pâte de feuillus pouvaient être expliquées par la longueur et l'épaisseur des fibres. Dinwoodie [15] a souligné l'importance des trois valeurs dérivées sur la résistance de la pâte dans une revue approfondie de la littérature, tandis que des chercheurs comme Ogbonnaya et Al [16] ont utilisé avec succès ces valeurs dérivées pour évaluer la pertinence de diverses matières premières non ligneuses pour la fabrication de pâtes et de papier.

La teneur en lignine et en cellulose des matières premières végétales détermine la résistance du papier. La résistance mécanique de la pâte, en particulier sa résistance à la traction, est directement proportionnelle à la teneur en cellulose, car la lignine est un polymère indésirable et son élimination lors de la réduction en pâte nécessite de grandes quantités d'énergie et de produits chimiques.

Tableau I.1: Propriétés morphologiques de quelques fibres végétales [17].

fibres	Longueur de la fibre (mm)	Diamètre de la fibre (μm)	Angle micro fibrillaire ($^{\circ}$)
Cotton	35	10-45	-
Lin	4-77	5-76	10
Chanvre	5-55	10-51	6.2
Kénaf	2.5-4.5	14-33	-
Jute	2.5	5-25	8
Sisal	900	8-50	20
Rami	900-1200	20-80	7.5

I.4.3. Fibres végétales et caractéristiques mécaniques

Les fibres végétales offrent une diversité importante en raison de leur composition chimique et de leur morphologie, affectant la nature, les conditions de formation et d'extraction, ainsi que les attributs associés. Les microfibrilles de cellulose sont rigides et hautes, avec une force de traction de 135 GPa. Les performances sont diminuées avec les composés amorphes, affectant les conditions de formation et d'extraction [18].

Les propriétés mécaniques des fibres végétales dépendent généralement des propriétés intrinsèques de ces fibres (structure de la section des fibres, porosité, angle de la microfibrille, facteur de forme, rapport longueur/diamètre, etc...), de propriétés anthropiques ou de propriétés indépendantes et variables (humidité, localisation des fibres dans... le tige, conditions naturelles, conditions de flexion, etc...). De nombreux facteurs influencent les propriétés mécaniques telles que le module d'Young (GPa), la prévention de la rupture (MPa) et l'extension de la rupture (%), ainsi que les sources telles que l'origine et la variation [19].

Tableau.I.2 : Propriétés de quelques fibres végétales. [20]

fibre	Densité (g/ cm³)	Humidité massique (%)	Déformation à la rupture (%)	Résistance à la rupture (MPa)	Module d'élasticité (GPa)
Jute	1.3	12.6	1.5-1.8	393-773	26.5
Lin	1.5	10.0	2.7-3.2	345-1035	27.6
Chanvre	-	10.8	1.6	690	-
Sisal	1.5	11.0	-	-	9.4-22.0
Bambou	0.8	-	-	391-1000	48-89

I.4.4. Structure interne des fibres végétales

Les fibres végétales sont constituées d'individus ou de cellules de base, avec la plupart des fibres naturelles étant multicellulaires. Les cellules de base du coton et du kapok sont uniques, ce qui les rend unicellulaires. Les cellules sont des microfibrilles de cellulose cristalline disposées sur une couche complète de lignine amorphe et d'hémicellulose. Le mélange de ces couches crée de multiples couches cellulaires. Au niveau cellulaire, les fibres lignocellulosiques sont entourées d'une lamelle médiane, garantissant la cohésion cellulaire et déterminant les caractéristiques de résistance des fibres. La

deuxième cellulaire, également appelée couche secondaire, est composée de trois couches distinctes (S1, S2 et S3) et renferme la majorité de la cellulose. La couche médiane S2 est la plus épaisse et déterminante en termes de caractéristiques mécaniques, découlant de microfibrilles de cellulose parallèles hélicées suivant un angle microfibrillaire. Le lumen est la cavité centrale qui permet la circulation des sels (figure I-5) [21].

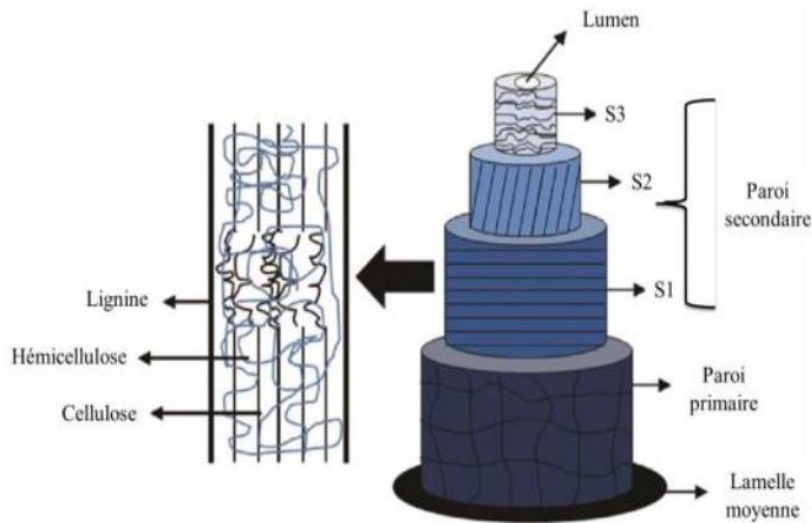


Figure.I.5 : Représentation schématique de la paroi cellulaire.

I.4.5. Composition chimique des fibres végétales

Les principaux composés des fibres lignocellulosiques sont la cellulose, les lignines, les hémicelluloses et les pectines. Pour mieux comprendre leurs effets sur les propriétés des fibres végétales, il est nécessaire d'avoir une connaissance solide de la composition chimique de ces éléments.

Cette section ne traitera pas de substances à faible masse moléculaire (matières extractibles, inorganiques,...). Les propriétés mécaniques et physiques des fibres sont peu affectées par leur proportion.

la cellulose :

La cellulose représente environ 1,5 fois 10^{12} tonnes de la production annuelle totale de biomasse par photosynthèse, ce qui en fait la ressource polymère renouvelable la plus abondante disponible

aujourd'hui dans le monde. La photosynthèse à l'aide de l'énergie solaire a produit 100 milliards de tonnes de carbone par an, dont la moitié est sous forme de cellulose. Dans les annales des polymères, la cellulose occupe une position particulière. Il y a plus de 150 ans, Anselme Payen a découvert et créé le terme de « cellulose » isolée provenant de plantes vertes. La cellulose est un polymère linéaire composé d'unités D-anhydroglucopyranose liées par des liaisons 1, 4-glucosidiques, avec un degré de polymérisation allant de 15 000 à 14 000. Les liaisons hydrogène inter et intra chaînes renforcent les chaînes de cellulose des cristaux, et les faibles forces de Van-der Waals maintiennent les feuilles adjacentes ensemble. Dans quelques cas, la cellulose est présente à l'état presque pur dans la nature, principalement en combinaison avec la lignine et d'autres polysaccharides.

La cellulose est principalement obtenue à partir de polysaccharides provenant de diverses plantes, souvent combinés avec d'autres biopolymères. La cellulose est principalement présente dans la matière lignocellulosique présente dans les forêts, dont le bois est la principale source. Les résidus agricoles, les plantes aquatiques, les graminées et d'autres végétaux sont d'autres matériaux celluloseux [22].

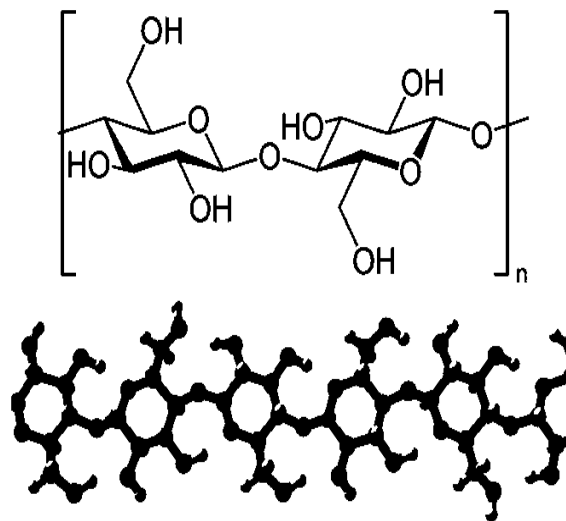


Figure.I.6 : structure de la cellulose

L'hémicellulose

L'hémicellulose, comme son nom l'indique, n'est pas une cellulose. Il s'agit de polysaccharides constitués d'une combinaison de cycles carbonés de 5 et 6.

La matrice porteuse des microfibrilles de cellulose est l'hémicellulose, qui se distingue de la cellulose

par trois caractéristiques : Tout d'abord, elle se compose de sucres neutres tels que la xylose, l'arabinose, le galactose, le glucose, le mannose, ainsi que des acides uroniques, tandis que la cellulose ne renferme que des unités de 1,4- β -D-glucopyranose. Ensuite, elle possède une ramification latérale importante en raison de sa nature non cristalline. Finalement, dans sa forme naturelle, elle présente un taux de polymérisation variant de 50 à 300, tandis que celui de la cellulose native est 10 à 100 fois supérieur. Elles sont sensibles à l'eau et ont tendance à se gonfler en présence d'eau, ce qui entraîne une instabilité de leurs dimensions [23].

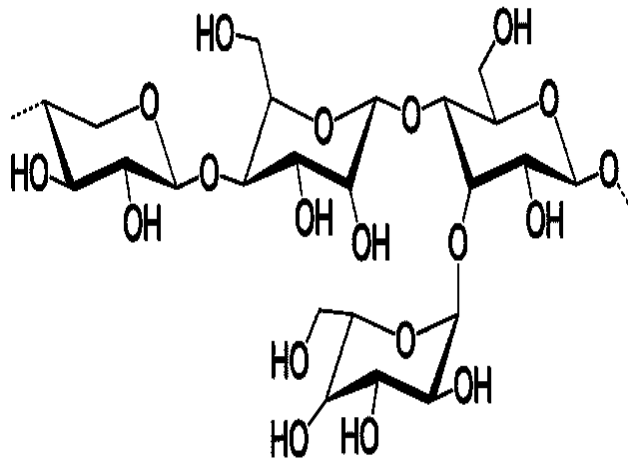


Figure.I.7 : structure de L'hémicellulose.

Le lignine

Après la cellulose, les lignines sont les polymères les plus répandus dans la biomasse végétale. Toutefois, pour le lin, la quantité de lignines présentes dans les fibres en elle-même est très faible, et elles se trouvent principalement dans le bois et l'écorce de la plante.

Ce sont des composés phénoliques. Les lignines présentes dans le lin par exemple sont l'acide ferulic, le guaiacyl et le syringyl .

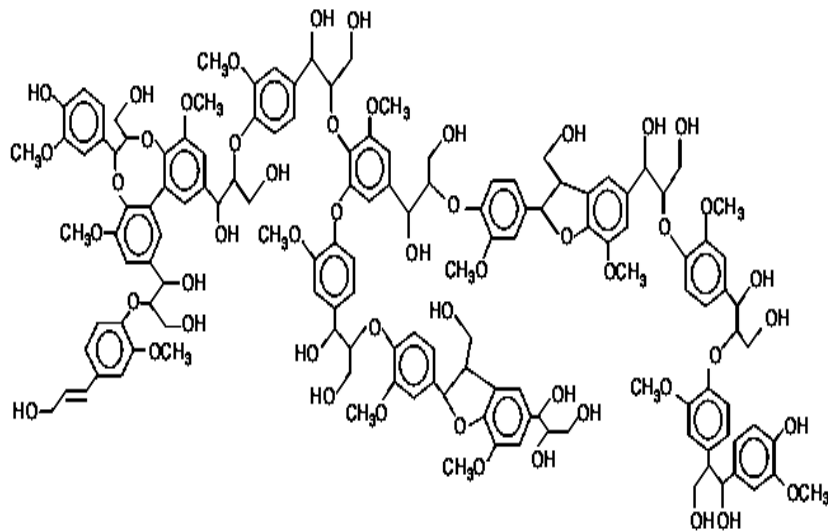


Figure.I.8 : structure de lignin.

La pectine

Les pectines renferment une grande quantité d'acide galacturonique. Les rhamnogalacturonanes, les homogalacturonanes présentes dans les lamelles mitoyennes et la paroi primaire des fibres, ainsi que les chaînes de galactanes majoritaires dans la paroi secondaire sont les principales composantes. Les pectines se combinent également avec le calcium pour former des complexes appelés pectates de calcium. On peut trouver ces complexes dans les lamelles voisines des jonctions tricellulaires.

Les pectines ont une grande capacité de sorption d'eau. Les pectines de pommes, de tournesol ou de citron peuvent absorber jusqu'à 95% de l'eau par rapport à la masse de produit sec, avec une humidité relative proche de 96%. La prise de poids dépend de la température et augmente en fonction de celle-ci. Jusqu'à présent, il n'existe aucune donnée dans la littérature sur la sorption d'eau des pectines extraites directement des fibres de lin [19].

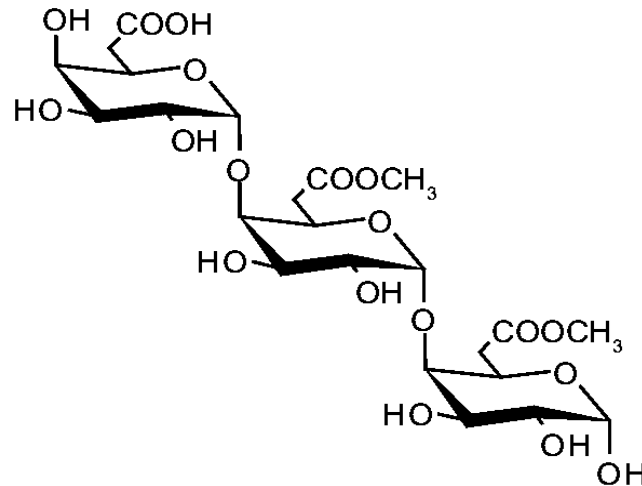


Figure.I.9 : structure de pectine

Tableau.I.3 : Composition chimique de fibres végétale[24].

Type de fibre	Cellulose (%)	Lignine (%)	Hémicellulose (%)	Pectine (%)	Cendres (%)
Lin	71	2.2	18,6 - 22,6	2,3	-
Kénaf	31 - 57	15 - 19	21,5 - 23	-	2 - 5
Jute	45 - 71,5	12 - 26	13,6 - 21	0,2	0,5 - 2
Chanvre	57 - 77	3,7 - 13	14 - 22,4	0,9	0,8
Ramie	68,6 - 91	0,6 - 0,7	5 - 16,7	1,9	-
Abaca	56 - 63	7 - 9	15 - 17	-	3
sisal	47 - 78	7 - 11	10 - 24	10	0,6 - 1

I.5.Technique D'obtention Des Fibres Végétales

Pour obtenir des fibres végétales, il faut passer par trois étapes : la récolte des plantes à utiliser, le rouissage et l'extraction, le rouissage étant parfois assimilé à l'extraction donc il est suffisant.

I.5.1. Le rouissage

Le processus d'obtention des fibres végétales consiste à retirer les faisceaux de fibres de la tige récoltée [25] après d'être décortiquer c'est-à-dire désolidariser la matière ligneuse et la fibre, cette étape peut être réalisée chimiquement ou biologiquement (le rouissage) [10], et pour cela les liants non cellulosiques tels que les pectines, les lignines et les cires doivent être éliminés. Néanmoins, pour obtenir les fibres les plus longues, il est essentiel de maintenir des teneurs élevées en cellulose et en hémicellulose. [26] Les tiges sont posées sur la terre ou l'eau (courante ou dans des bassins) et ses éléments naturels qui sont les microorganismes (ou l'eau de pluie en cas de rouissage au champ) qui réalisent le rouissage pendant une période qui varie entre 20 et 90 jours, suivant la météo [10, 27, 28].

Pour la plupart des applications, la fibre longue de type composite est utilisée directement. Cependant, lorsque cette fibre est défilée par des moyens chimiques, la mèche est décomposée en fibres beaucoup plus courtes et plus fines, appelées fibres ultimes [29]. Cette étape est fondamentale pour faciliter l'extraction et déminer la force mécanique appliquée sur la tige [27].



Figure.I.10 : Rouissage du lin.

I.5.2. L'extraction des fibres

Les tiges décortiquées après la récolte et le rouissage afin d'éliminer les fibres, par une technique appelée extraction. Il s'agit d'une phase cruciale et délicate dans l'utilisation des fibres naturelles.

Cette opération peut être réalisée par des méthodes mécaniques, biologiques, chimiques ou une combinaison de ces trois méthodes. Diverses parties de plantes sont utilisées et différentes méthodes d'extraction sont employées dans le monde entier pour obtenir des fibres [25].

Des recherches ont montré que la méthode d'extraction utilisée affecte de manière significative la distribution, la longueur, les propriétés mécaniques et les composants des fibres [26], de sorte que le processus d'extraction diffère en fonction de la localisation des fibres dans la plante et de l'objectif poursuivi [26, 30].

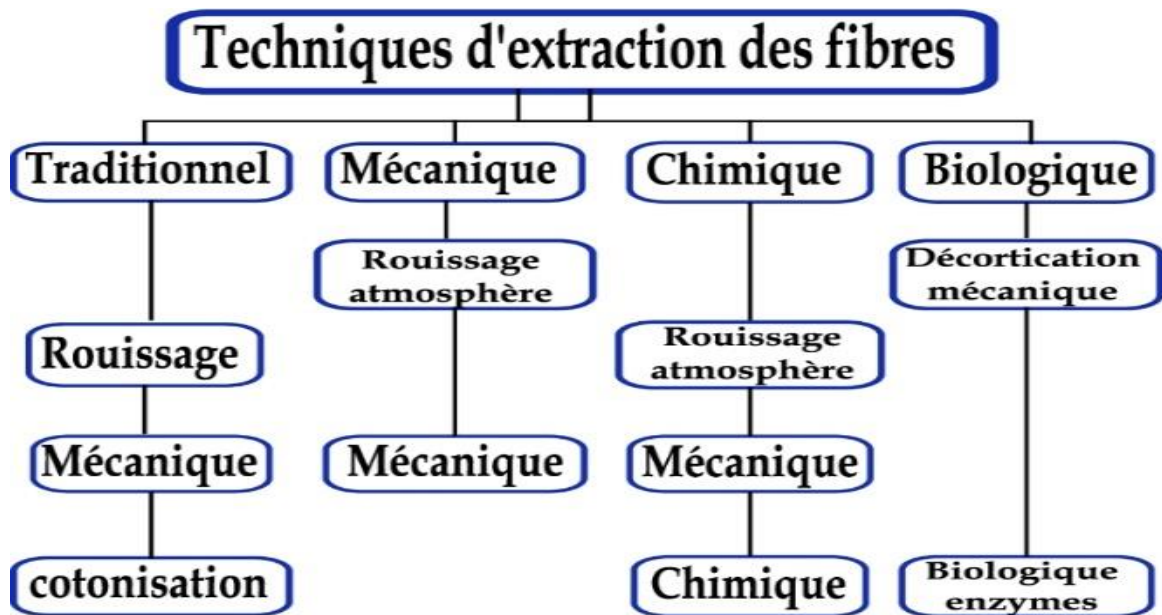


Figure.I.11 : les différentes techniques d'extraction des fibres

I.5.2.1.L'extraction traditionnelle des fibres végétales

Traditionnellement, l'extraction des fibres est réalisée manuellement par gratter la couche cireuse des feuilles grâce à un outil de grattage en fixant la feuille sur une plaque rigide [27] ou bien pelant les tiges une à une à la main. Le procédé était long et nécessitait beaucoup de main d'œuvre [28].

I.5.2.2.L'extraction chimique des fibres végétales : différents procédés chimiques existent, chacun avec ses propres caractéristiques :

- **Procédé Kraft:** utilise une solution d'hydroxyde de sodium et de sulfure de sodium pour éliminer la lignine, les pectines et les hémicelluloses.
- **Procédé au bisulfite :** utilise des sels de l'acide sulfureux pour séparer la lignine des fibres de cellulose.
- **Procédé acide :** utilise un acide fort comme l'acide sulfurique ou chlorhydrique pour dissoudre la lignine.
- **Procédé Soude-Anthraquinone :** utilise un catalyseur (anthraquinone) pour réduire le temps de cuisson et augmenter le rendement en pâte.
- **Procédé à la soude :** utilise uniquement la soude NaOH pour dissoudre les substances non cellulosiques.

I.5.2.3.L'extraction biologique : utilise des microorganismes pour dégrader les composants non cellulosiques et libérer les fibres.

I.5.2.4.L'extraction mécanique : Les lignes de teillage sont des lignes mécaniques utilisées pour collecter les fibres libériennes. Elles impliquent le broyage (pour fragmenter le bois), le battage (pour enlever le bois de la ligne de teillage), et le peignage (afin de démêler, aligner et paralléliser les faisceaux) respectivement [27].

Tableau.I.4 : quelque machines d'extraction de fibres végétales [31].

machine	utilisation	caractérisation
Extracteur de fibres de jute CRIJAF	Jute, mesta, chanvre de sunn et ramie	Capacité : 25, 15, 8 et 10 kg de fibres sèches par heure
Extracteur de fibres de pseudo- tige de bananier	Pseudo-tige de bananier	Capacité : 25-30 kg de fibres/jour
Extracteur de fibres de feuilles d'ananas	Feuille d'ananas	Capacité : 25 kg de fibres par tonne de feuilles fraîches
Extracteur de fibres de lin amélioré	Tige de lin séchée	Capacité : 7-8 kg de fibres sèches par heure
Extracteur de fibres de feuilles de sisal	Feuille de sisal	Capacité : 12-14 kg de fibres sèches par heure

I.6. Techniques de mise en œuvre des matériaux composites

La majorité des techniques de réalisation impliquent la création de pièces en matériaux composites en utilisant des couches successives comprenant une matrice et un renfort. La stratification, une technique générale qui conduit à la création de stratifiés, nous amènera ensuite à nous pencher sur l'architecture des matériaux composites[32] .

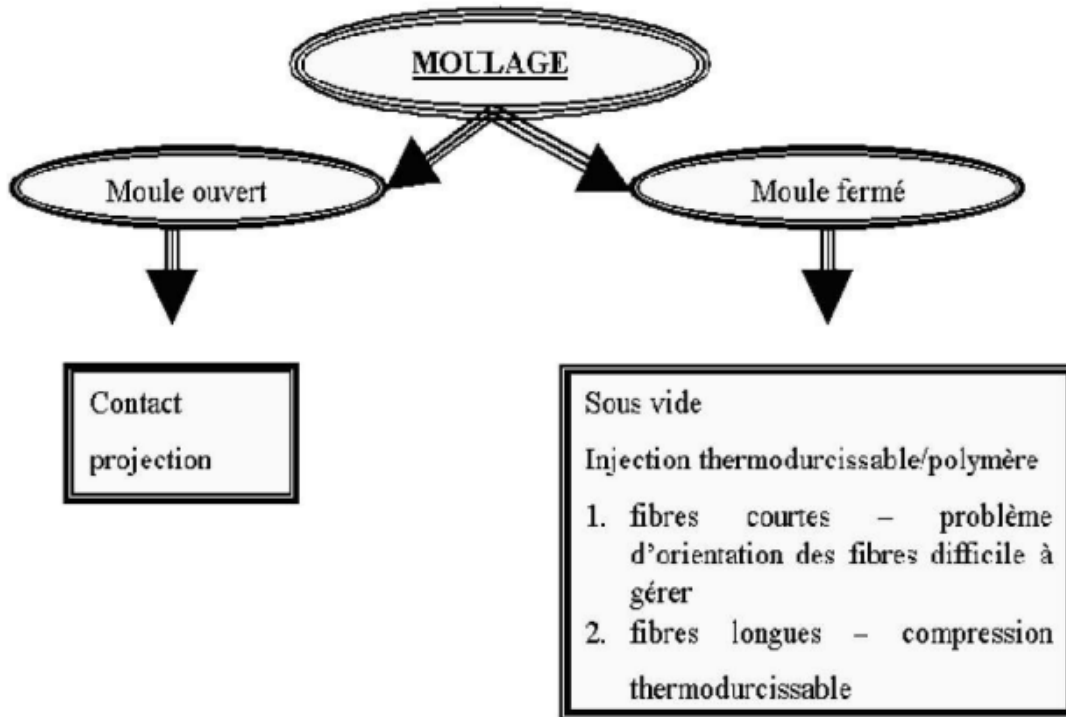


Figure.I.12 : différentes techniques de moulage.

Moulage au contact

Cette méthode implique de placer dans le moulage deux éléments : une couche de surface (gelcoat) et des renforts en couches successives de mat ou de tissu imprégnés de résine, les couches s’accumulent jusqu’à l’épaisseur désirée, puis le moule se polymérise à température ambiante ou par chauffage, et une fois que toute la résine a été durcie, nous pouvons démouler et détourer la pièce obtenue.

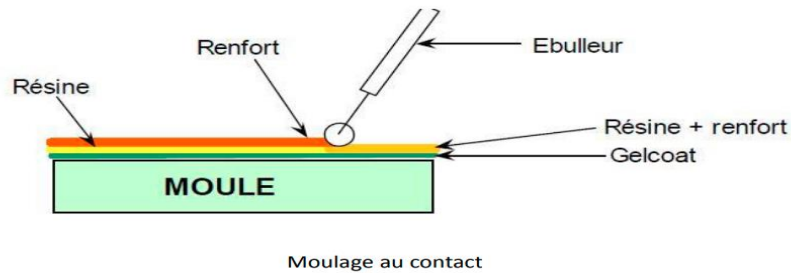


Figure.I.13 : Principe du moulage au contact.

Moulage par projection simultanée

L'injection de moulage commence par la construction d'un moule composé de deux parties : une partie fixe et une partie mobile. Ensuite, le moulage est effectué à l'aide d'une machine appelée « presse à injection ». Ainsi, la partie fixe et la partie mobile du moule sont fortement pressées l'une contre l'autre. En étant soumise à une pression élevée, la matière se décompose. Une fois que la matière a refroidi, elle peut être retirée du moule. Ainsi, vous recevez votre pièce industrielle[33] .

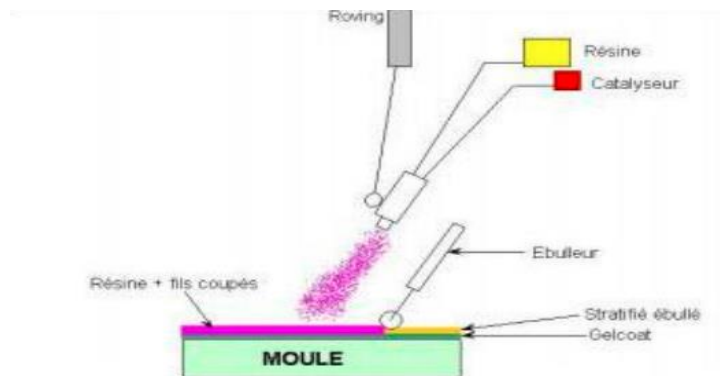


Figure.I.14 : Principe du moulage par projection simultanée.

Moulage sous vide

Le moulage sous vide implique l'utilisation simultanée du vide et de la pression de l'air. Suite à l'enduction du gel-coat, le renfort est placé sur un moule rigide, puis la matrice est coulée. Ensuite, le contre-moule est recouvert d'une membrane qui garantit l'étanchéité (feuille de caoutchouc, nylon, etc.). La dépression est générée par une pompe à vide à travers le moule et le contre-moule poreux, ce qui permet d'étaler et de débuller la résine. Il est possible de restreindre le contre-moule à une seule membrane d'étanchéité [34].

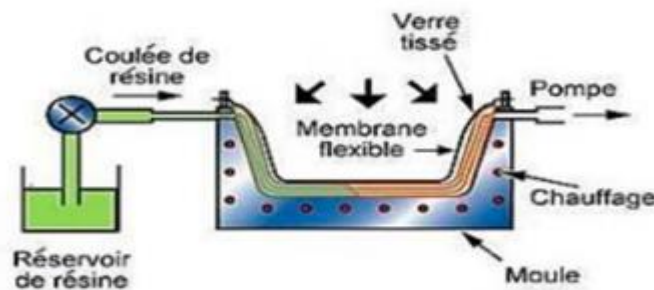


Figure.I.15 : Méthode du moulage sous vide.

Moulage par injection de résine ou RTM

Par injection de résine sous pression, le moulage implique l'imposition d'un renfort à l'intérieur d'un ensemble moule et contre-moule extrêmement rigide et fermé. L'automatisation de l'alimentation des résines permet d'éviter leur manipulation. On peut avoir une proportion élevée de renfort, ce qui entraîne l'obtention de pièces avec des caractéristiques mécaniques élevées. Ce processus de moulage est adapté pour fabriquer des pièces profondes et des formes complexes. La résine est généralement injectée à une pression basse d'environ 0,3 MPa .

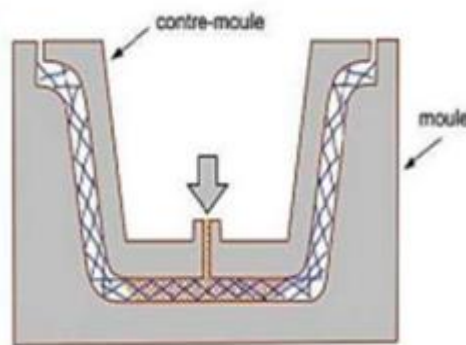


Figure.I.16 : Principe du moulage RTM [35].

Moulage par compression

Selon cette méthode, une préforme de composé de moulage (résine, renfort, catalyseur et additifs déjà pré-mélangés dans des proportions optimales) est placée dans la cavité d'un moule chauffé, puis elle est pressée jusqu'à atteindre ses dimensions finale.

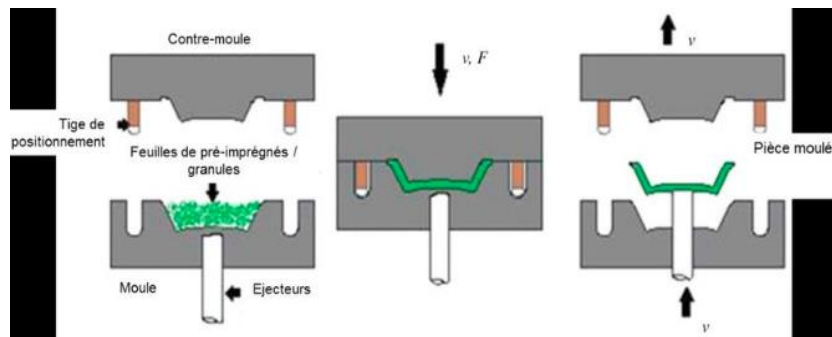


Figure.I.17 : Méthode de moulage par compression[36].

I.7. Techniques de mise en œuvre des matériaux biocomposites

Les biocomposites sont transformés à l'aide de techniques telles que l'extrusion mono ou baxis, le mélange interne, la compression et le moulage par injection. Le processus comporte deux étapes : mélanger la fibre avec un polymère dans la première étape, puis façonner le composite par injection ou extrusion dans la deuxième étape. Ces techniques permettent des cadences de production élevées grâce à des temps de cycle courts et à l'automatisation des processus.

La composition permet d'obtenir les semi-produits les plus homogènes, la matrice et les fibres entrant dans des étapes identiques ou séparées. Les fibres sont ajoutées au même niveau ou en plusieurs points sur la vis pour obtenir des taux volumétriques plus élevés et limiter la dégradation. La vis homogénéise ensuite la matière à travers le filtre, qui peut avoir un profil précis ou une forme cyclique pour les parties granulées. L'injection est un élément crucial des processus à grande échelle de fabrication de plasturgie et de composites. La matière est introduite dans la trémie, chauffée dans la vis, puis injectée dans un moule [35, 37].

I.8. Avantages et inconvénients des fibres végétales

Les fibres végétales naturelles sont les plus couramment utilisées pour renforcer les matériaux composites en raison de leur disponibilité et de leur rentabilité, offrant une alternative aux fibres de verre en raison de leur recyclabilité. Ces fibres offrent de nombreux avantages en tant que renfort, mais certains inconvénients peuvent freiner le développement industriel.

Les principaux avantages et inconvénients sont rassemblés dans le tableau ci-dessous

Tableau I.5 : Avantages et inconvénients des fibres naturelles [38].

Avantages	Inconvénients
Faible cout	Absorption d'eau
Biodégradabilité	Faibles stabilité dimensionnelle
Neutre pour l'émission de CO_2	Mauvaise tenue en vieillissement.
Pas d'irritation cutanée lors de la manipulation des fibres.	Faible tenue thermique (200 à 230 °C max)
Pas de résidus après incinération	Fibres anisotropes.
Ressource renouvelable	Variation de qualité en fonction du lieu de croissance, de la météo...
Demande peu d'énergie pour être produite	Pour des applications industrielles, demande la gestion d'un stock.
Propriétés mécaniques spécifiques importantes (résistance et rigidité).	Renfort discontinue.
Bonne isolation thermique et acoustique	
Non abrasif pour les outillages	

I.9.Applications des matériaux biocomposites

Dans l'esprit des gens, les produits techniques sont souvent associés à des fibres synthétiques hautes performances, mais en réalité de nombreux produits techniques sont fabriqués à partir de fibres naturelles en raison de leurs propriétés uniques.

Les composites constitués de fibres synthétiques renforcées sont maintenant remplacés par des biocomposites. Ils sont respectueux de l'environnement et contribuent à réduire les coûts croissants des matériaux à base de pétrole. Les biocomposites sont constitués de matrices polymères et de fibres naturelles ou de biofibres (généralement de plantes ou de cellulose). De nombreux avantages sont offerts par les biofibres, notamment la recyclabilité, la renouvelabilité, la biodégradabilité, la faible densité et la résistance spécifique élevée. De plus, l'utilisation de biofibres peut répondre aux problèmes environnementaux et financiers des matériaux industriels.

De manière générale, les biocomposites attirent de plus en plus l'attention des universitaires et des industries telles que le bâtiment, l'automobile, l'emballage, etc. Les applications de construction ont connu une forte croissance parmi toutes les applications existantes, qu'il s'agisse de composants structurels ou non structurels.

- ❖ En construction : Par exemple, ils sont utilisés dans une grande variété de matériaux de construction tels que clôtures, terrasses, bardages, portes, fenêtres, ponts, fibrociment, les parements, le toit, et etc [38].
- ❖ Dans l'aéronautique : En 2014, un projet de coque de siège d'avion en composite lin a été présenté au salon JEC composites à Paris, présentant de nombreux avantages pour l'industrie aéronautique. La coque du siège fabriquée à partir de panneaux de fibres de lin est plus légère que celle fabriquée à partir de fibres de verre.
- ❖ Autres applications : Les palettes, le mobilier comme table de camping LAFUMA ou chaise IKEA. (LAFUMA est une marque française et IKEA est une marque mondiale d'ameublement) [39].

Certains domaines d'application des fibres végétales sont illustrés par les figures ci-dessous :

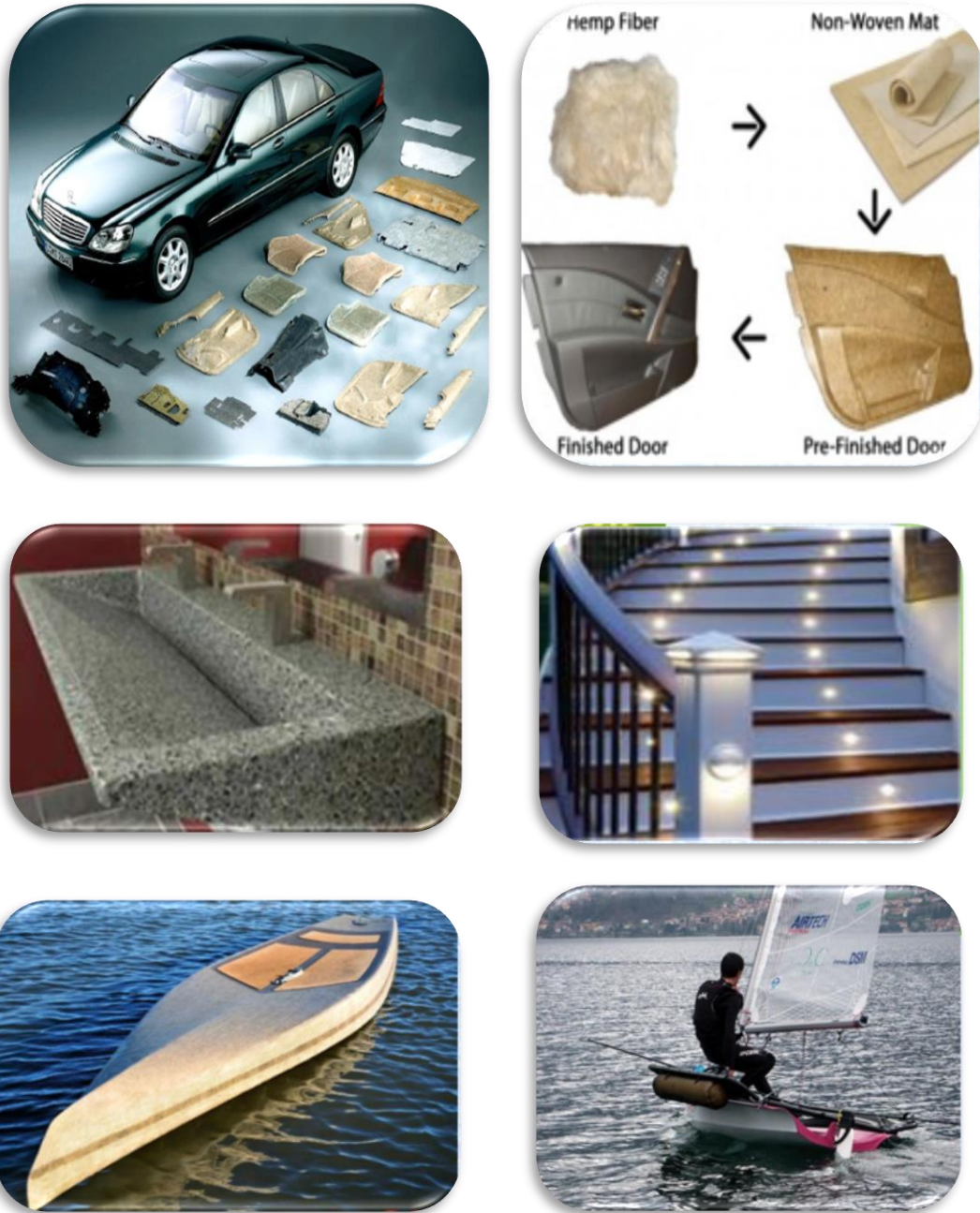


Figure.I.18 : Différents domaines d’application des matériaux biocomposites

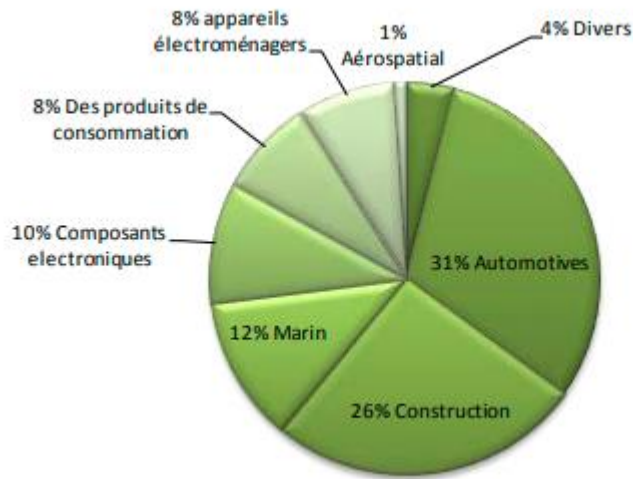


Figure.I.19 : Utilisation des fibres naturelles avec des bio-composites [8] .

I.10.Conclusion

Les matériaux composites ont attiré l'attention du monde entier au cours des dernières années en raison de leur respect de l'environnement et de l'avantage d'être renouvelables, recyclables et biodégradables.

Ils ont des propriétés physiques spécifiques telles qu'une densité spécifique et une résistance spécifique élevée, mais ils présentent certaines faiblesses telles qu'une sensibilité élevée à l'humidité et des propriétés de dispersion élevées.

L'objectif des producteurs de matériaux composites est de rivaliser et d'exceller par rapport aux autres matériaux industriels courants en continuant à améliorer leurs propriétés, ce qui nécessite un développement et une innovation continus comme objectif principal pour servir le secteur de production.



Chapitre II :
Etude expérimentale

II.1. Introduction

Ce chapitre est consacré à la présentation des matériaux et du matériel utilisé dans le cadre de cette étude. Il expose le procédé de fabrication des échantillons en composite à fibres de lin et de cactus qui font l'objet de ces expérimentations.

Il présente aussi le protocole expérimental, en outre, il explique les modes opératoires des essais de traction réalisés dans cette étude dans le but d'une bonne interprétation des différents résultats expérimentaux.

II.2. Présentation des fibres utilisées

II.2.1 Fibre de lin

La plante de lin est une espèce d'arbres de la famille des Linacées. Il s'agit d'une plante annuelle avec une tige de 0,6 à 1,2 m de hauteur et de 1 à 3 mm de diamètre. Le lin textile est cultivé dans le nord. En Europe, il se rencontre en Russie, en Pologne, en Belgique et en France (principalement en Normandie). Le lin peut être coupé ou arraché, la matière textile est récupérée à partir de la tige de la plante sous forme de faisceaux qui forment la fibre technique. La cellule primitive, également connue sous le nom de fibre ultime de lin, se présente sous la forme d'un cylindre imparfait polygonal, habituellement à six côtés, avec éventuellement un lumen (cavité centrale d'une fibre biologique) [38].



Figure.II.1 : La plante de lin.

II.2.2 Fibre de cactus

La plante de cactus ou figuier de barbarie est une espèce d'arbre originaire des régions arides et semi-arides du Mexique, introduite en Afrique du Nord au XVI^e siècle[40]. Il s'agit d'une plante robuste et fibreuse qui peut atteindre une hauteur de 5 mètres, avec un tronc épais et bien développé. Elle présente des articles aplatis en forme de raquettes (cladodes) de couleur vert mat, de 20 à 50 cm de long et de 15 à 30 cm de large, recouverts de petites Aréoles et d'épines.



Figure.II.2 : La plante de cactus.

II.3. Extraction des fibres de lin et de cactus

Les méthodes d'obtention des fibres diffèrent d'une plante à l'autre.

II.3.1. Extraction des fibres de lin

Une fois les pailles de lin arrachées et rouissées, on les décortique pour en extraire les fibres. De nos jours, on utilise des lignes mécanisées, Cette opération s'appelle le taillage. Pour se faire il suffit de concasser, broyer écraser le lin entre vos mains ou mécaniquement pour de grosses quantités avec une machine à taillage [41].

La fibre de lin utilisée dans ce travail est fournie par l'usine de fabrication des cordes et des câbles en fibres naturelles de BLIDA (figure II.3.).



Figure.II.3 : Fibre de lin.

II.3.2 Extraction des fibres de cactus

Les fibres de cactus peuvent être extraites du tronc de la plante ou des raquettes (cladodes) de cactus. Cette dernière est constituée de différentes couches ou paquets de fibres, séparées les unes des autres par une matière organique appelée oxalate de calcium qui joue le rôle de matrice.[42]

Afin d'isoler les couches de tissu du liant (oxalate de calcium) et ainsi obtenir l'extraction de la fibre, deux techniques sont adoptées, il s'agit d'immerger le tronc dans de l'eau ou l'enfouir dans la terre à une profondeur de 30 cm pendant 15 à 20 jours. Cela favorise la fermentation de l'oxalate de calcium, ce qui facilite l'extraction des couches. Ensuite la fibre est lavée à l'eau et séchée à l'air libre (figure II.4).

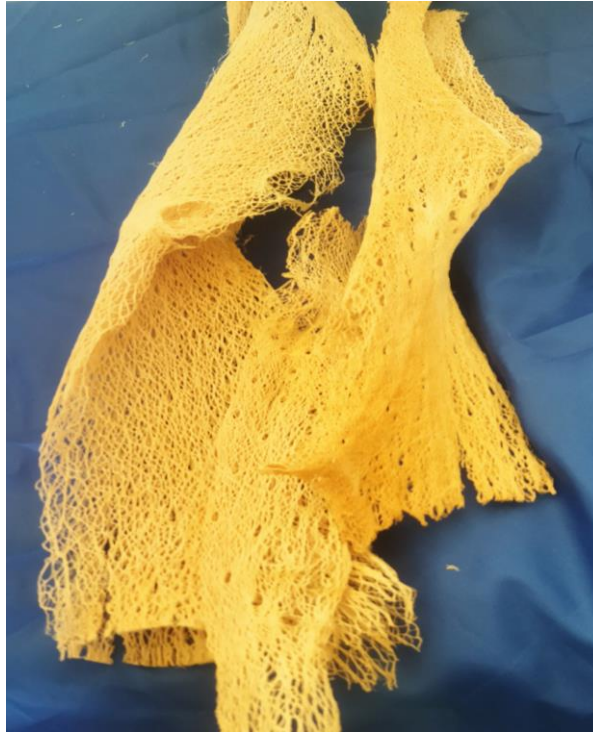


Figure.II.4 : Fibre de cactus.

II.4. Matrice

La matrice utilisée dans ce travail est une résine époxyde appelée MEDAPOXY STR commercialisée par la société GRANITEX, Alger, sous forme de kit pré-dosé de deux composants (Figure.II.5) :

Élément A : Résine.

Élément B : Durcisseur HY951.

Associée au durcisseur avec des proportions en masse de 60/40, la polymérisation complète de cette résine se fait après 14 jours en température ambiante de 20 à 25°C. Cette durée peut être diminuée à 24h ou 8h pour une température de 40°C ou 60°C, Selon le fournisseur. La densité de MEDAPOXY STR est de $1,1 \pm 0,05$ selon la norme ISO758 et une viscosité de 11000Mpa à 25 °C selon la norme NF T76-102).



Figure.II.5 : a) Résine et b) Durcisseur

II.4. Elaboration du matériau de l'étude

II.4.1. Préparation du renfort

Avant d'élaborer les bio composites, on doit d'abord passer par la préparation des renforts sous forme de plis. Le renfort de cactus est découpé à partir du tissu cellulaire long (réseau cellulaire ramifié) à partir du tronc de la plante formant ainsi des plis de dimensions 30x15 mm (figure II.6) et le renfort du lin est constitué par des fibres longues de lin.



Figure.II.6 : Renfort de cactus

L'étape de préparation du renfort en lin nécessite un soin particulier pour que les fibres longues soient alignées et adjacentes, ensuite couturées sous forme d'un pli, afin d'assurer un pli homogène de longueur 30x15 mm.

Pour notre cas, et en raison de la difficulté de coudre les fibres de lin, ces derniers sont disposés côte à côte en petits paquets et collés sur du papier blanc avec de la colle à papier, le collage est appliqué seulement sur les bouts afin de pouvoir retirer le papier par la suite et pendant l'élaboration des plaques composites. Le processus de collage se poursuit jusqu'à l'obtention des plis de dimensions de 30 x 15mm (figure II.7).



Figure.II.7 : Processus de collage des fibres de lin

II.4.2. Elaboration des plaques bio composites

Les bio composites élaborés sont des stratifiés constitués par 3plis, et ils sont obtenus sous forme de plaques de dimensions 300x150 mm², alors que la plaque en résine seule est élaborée par coulée dans un moule en verre de 250x250 mm² (Figure II.8).

La mise en œuvre des plaques bio composites est réalisée par moulage sous vide, en utilisant la technique dite du « sac ». Pour ce faire, une vitre épaisse est utilisée comme un moule pour la fabrication de ces plaques.

Les étapes de préparation d'une plaque bio composite (Figure II.8) consiste à déposer un tissu d'arrachage sur un moule préparé préalablement, suivi par le dépôt du premier pli de fibres, ensuite l'étalement de la résine sur toute la surface du pli par un pinceau, l'opération de dépôt de pli et son étalement de résine est répétée pour tous les autres plis constituant la plaque et enfin un tissu d'arrachage est déposé.

Avant de faire fonctionner la pompe à vide il faut tout d'abord fermer le moule par un film plastique transparent (cellophane) qui est collé sur le pourtour de la vitre par une bande adhésive. La dépression de l'ordre 30 KPa pendant 6 heures (jusqu'à la polymérisation de la plaque) provoquée par la pompe permet d'exercer une force de compression sur la plaque, ce qui permet de densifier la plaque et de dégager les bulles d'airs. La plaque ainsi démoulée après 6 heures (Figure II.9) est laissée à température ambiante pendant 14 jours afin d'avoir une polymérisation totale, où elle sera découpée en échantillon selon la norme ASTM désirée (de traction) et enfin les éprouvettes seront testées.



Figure.II.8 : Elaboration d'une plaque de résine



Figure.II.9 : Elaboration d'une plaque biocomposite

II.4.3 Préparation des échantillons

Pour la réalisation des essais statiques, les échantillons sont découpés à partir des plaques biocomposites et de résine, selon la norme ASTM D5083. Pour faciliter la découpe, la tronçonneuse d'un disque en diamant de diamètre 200 mm (figure II.10 et II.11), et une vitesse de coupe de 2500 tr/min avec lubrification. Après la découpe les éprouvettes obtenues ont les dimensions de 250 x 50 x 3,56 mm.



Figure.II.10 : Tronçonneuse à disque en diamant



Figure.II.11 : Echantillons utilisés en Traction : Composite, résine et fibre de cactus.

II.5.Caractérisation mécanique en traction

Les essais mécaniques de traction statique sur les fibres de lin et de cactus, ainsi que le composite stratifié et de la résine époxyde sont réalisés sur une machine d'essai universelle de type *test GmbH*, model *112 SKN* (figure II.12) du laboratoire de pétrochimie de l'Université de Skikda.

Cette machine est équipée d'une cellule de charge de 5 kN et d'un système d'entraînement de la traverse à l'aide d'un moteur électrique. La machine est pilotée par un logiciel qui permet d'enregistrer les résultats sur un fichier texte sous forme d'un procès-verbal d'essais qu'on pourra exploiter par la suite sur un ordinateur personnel ou portable en utilisant un utilitaire (Microsoft Excel, Origine, Matlab, ...) qui permet de lire le fichier récupéré.



Figure.II.12 : Machine universelle de type *test GmbH*, model *112 SKN*

II.5. 1. Essai de traction sur un fil

Les propriétés mécaniques (contrainte et déformation à la rupture et module de Young) des fils de lin sont déterminées selon la norme ASTM D 3822-01 en utilisant une longueur de mesure (GL) de 50 mm. Les tests ont été conduits sur la machine de traction avec une vitesse de 1 mm/min, à température ambiante (environ 23 °C) et un taux d'humidité de l'ordre de 50 %.

Les valeurs de la force et du déplacement de la traverse mobile sont enregistrées simultanément. Les contraintes et les déformations à la rupture et le module de Young, peuvent être déterminées par les équations (II.1, II.2 et II.3) et selon la norme ASTM D 3822-01 comme suit :

$$\sigma = \frac{F}{S} = \frac{F}{\pi r^2} \quad (\text{II.1})$$

$$\varepsilon = \frac{\delta l}{l_0} \quad (\text{II.2})$$

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (\text{II.3})$$

Où :

F : la force (N).

S : la section de la fibre (mm²).

δl : la valeur obtenue par la machine (mm).

l_0 : la longueur initiale (mm).

σ : la contrainte à la rupture (MPa).

ε : la déformation (%).

E : le module de Young (GPa).

II.5. 2. Essai de traction statique sur le renfort en cactus et sur les bio composites

L'essai de traction détermine l'aptitude d'un matériau à se déformer, soumis à un effort variable. Ce type d'essai est nécessaire pour prévoir le comportement du matériau dans des conditions réelles d'utilisation et il consiste à appliquer sur une éprouvette un effort F et à mesurer l'allongement correspondant δl , ou inversement d'imposer l'allongement δl et à mesurer l'effort F (Figure II.13). La distance entre les mâchoires est de l'ordre de 150 mm (selon la norme ASTM D 5083), la température de la salle d'essai est fixée à 23°C. Afin de caractériser le matériau, on introduit des variables relatives au matériau : la contrainte et la déformation qui peuvent être déterminées selon la norme ASTM D 5083, par les équations :

$$\sigma = \frac{F}{S} = \frac{F}{a*b} \quad (\text{II.4})$$

$$\varepsilon = \frac{l-l_0}{l_0} \quad (\text{II.5})$$

Où :

F : la force (N)

S : la section de l'éprouvette (mm^2)

a et b : l'épaisseur et la largeur de l'éprouvette (mm)

l : la valeur obtenue par la machine (mm)

l_0 : la longueur initiale (mm)

σ : la contrainte à la rupture (MPa)

ε : la déformation (%).

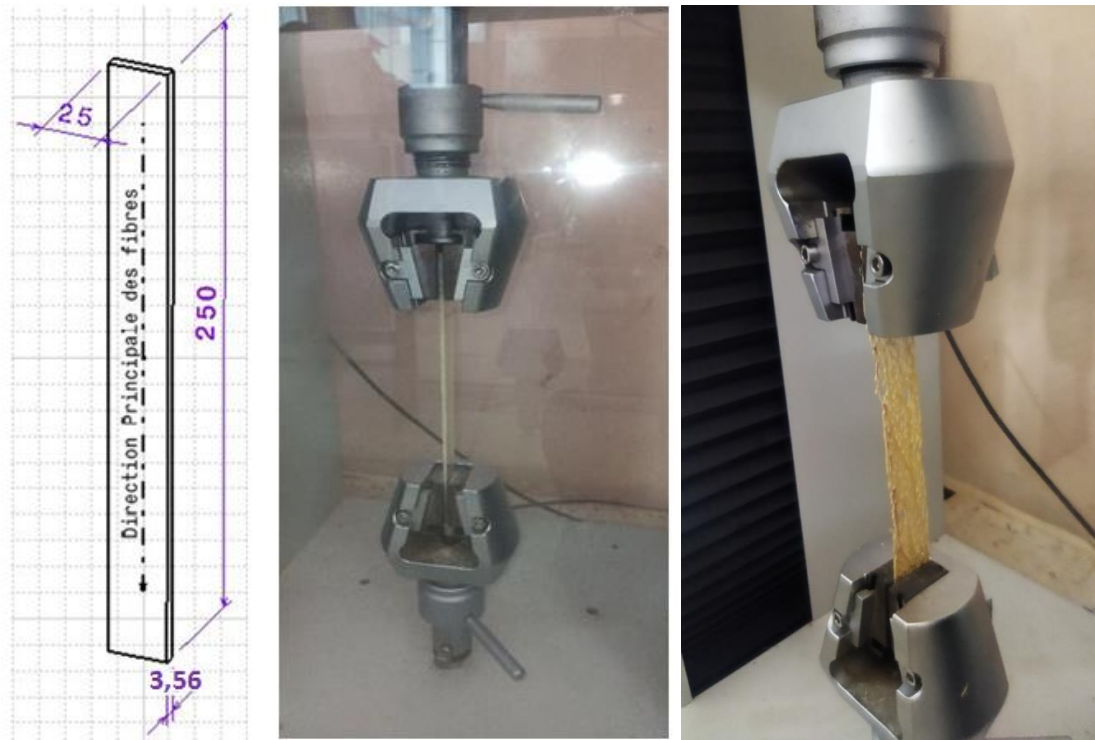


Figure.II.13 : Essai de traction sur les bio composites et le cactus.

II.6. Conclusion

Ce chapitre a été consacré à l'élaboration des stratifiés en bio composite ainsi que la description du matériels utilisé. Les types du renfort et de la matrice utilisés pour la fabrication des plaques stratifiées lin/cactus/lin ont été définis. Une description des techniques expérimentales, statiques, et les normes des essais utilisés ont été exposées.



Chapitre III :
Interprétation
des résultats

III.1. Introduction

Ce chapitre décrit les résultats des travaux expérimentaux menés pour déterminer les propriétés mécaniques de composites renforcés de fibres végétales testés dans le laboratoire de pétrochimie de l'Université de Skikda.

Le composite utilisé dans cette étude est un stratifié formé par des fibres de cactus et de lin comme renfort imprégnés dans une matrice époxyde. Le comportement mécanique des constituants du composite sont étudiés séparément. Pour cela des courbes force/déplacement et contrainte/déformation issus des tests de traction, effectués sur les fibres de lin et de cactus, sur les éprouvettes de résine époxyde et enfin sur le composite dans son ensemble, sont tracés.

III.2. Résultats et discussions

III.2.1. Essais de traction sur le fil de lin

Les propriétés mécaniques (contrainte et déformation à la rupture) des fils de lin sont déterminées selon la norme *ASTM D 578* en utilisant une longueur de mesure (GL) de 50 mm et une vitesse de déplacement de 1 mm/min. Les tests ont été conduits sur une machine de traction universelle de type *test GmbH*, model *112 SKN*, d'une capacité de 5 KN.

Pour optimiser les propriétés mécaniques du composite et de ces constituants les expériences sont menés sur trois échantillons de même type.

Trois éprouvettes de fil de lin ont été testés jusqu'à la rupture en traction statique et les résultats obtenus sont présentés dans la figure III-1. On constate une variation dans les valeurs de la contrainte à la rupture et la déformation. L'analyse des résultats obtenus sont récapitulés dans le tableau III.1.

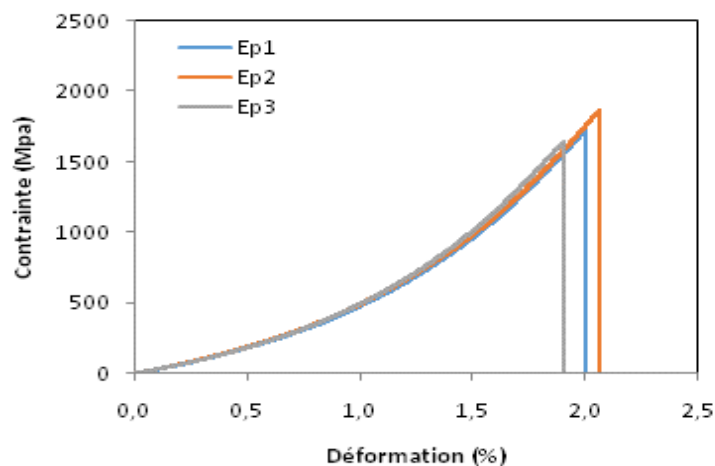


Figure.III.1: Courbe contrainte-déformation du fil de lin

La courbe type contrainte-déformation (Figure III.2) obtenue à partir des essais de traction statique des fils de lin étudiés, montre que la contrainte varie quasi linéairement avec l'augmentation de la déformation jusqu'à ce qu'elle atteigne sa valeur maximale suivie d'une diminution brusque de la contrainte.

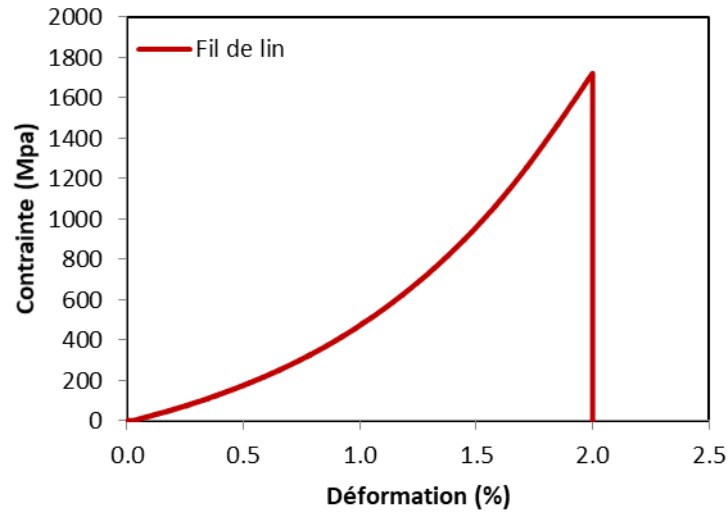


Figure.III.2 : Courbe type contrainte/déformation d'un fil de lin.

Tableau III.1 : Propriétés mécaniques en traction des éprouvettes fibres de lin seule.

	Force (N)	Déplacement (mm)	Contrainte (MPa)	Déformation (%)
Eprouvette 1	77.84	1.00	1721.53	2.00
Eprouvette 2	73,95	0,98	1859,25	2,06
Eprouvette 3	84,07	1,03	1635,45	1,9

III.2.2. Essais de traction sur la fibre de cactus

Les tests de traction du renfort en cactus (figure III.3) ont été conduits sur la même machine de traction selon la norme ASTM D 5083 en utilisant une longueur de mesure (GL) de 150 mm et une vitesse de déplacement de 1mm/min. les dimensions des éprouvettes utilisées sont de 250x25x1 mm³.

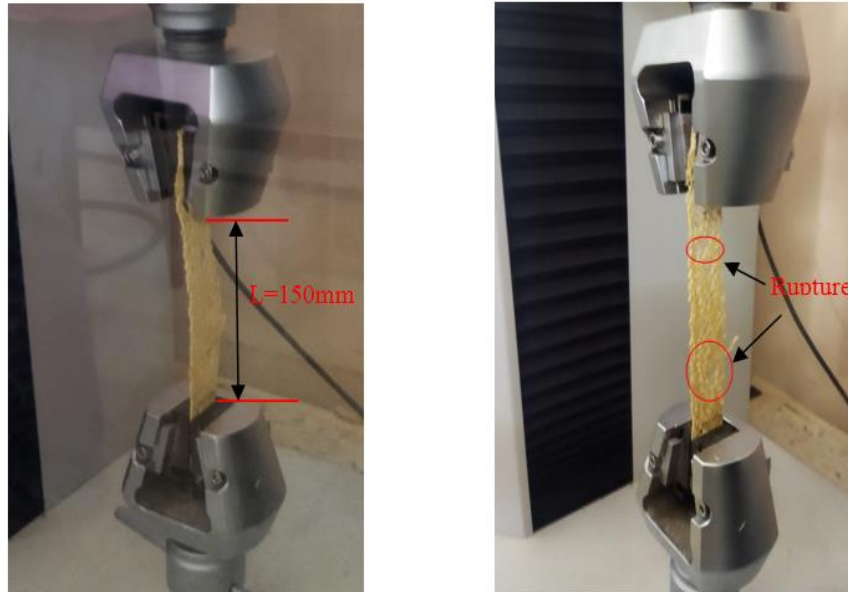


Figure.III.3 : Essai de traction sur une éprouvette de cactus.

La figure III.4 représente les courbes contrainte-déformation de trois éprouvettes de cactus testés en traction. L'allure des courbes montre que la contrainte varie linéairement avec l'augmentation de la déformation jusqu'à ce qu'elle atteigne sa valeur maximale suivie d'une diminution brusque de la contrainte. Cette diminution est due à la rupture brusque des cellules formant le tissu de cactus.

Les valeurs des propriétés mécaniques obtenues des trois éprouvettes sont illustrées sur le tableau 2. D'après ce tableau, nous constatons un écart entre les valeurs des échantillons. Cela est dû à la forme de l'éprouvette testée et à la différence de leur architecture.

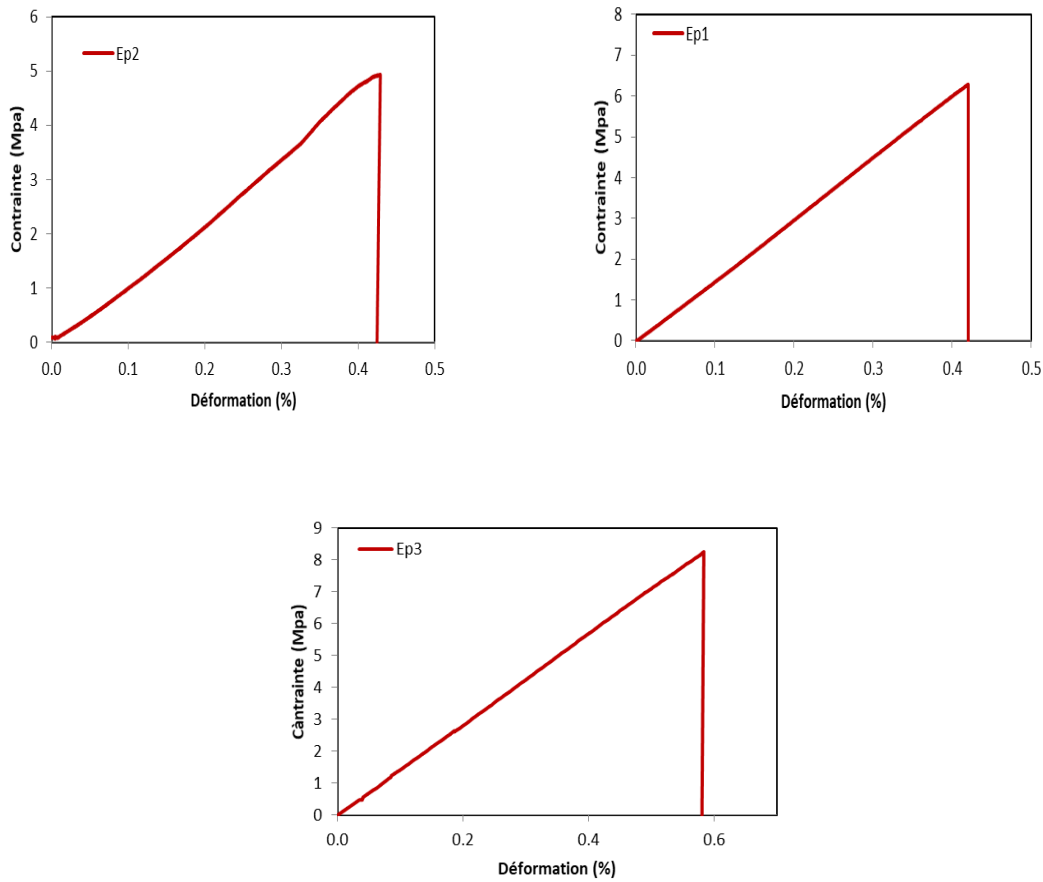


Figure.III.4: Courbe contrainte/déformation de la fibre de cactus

Tableau III.2 : Propriétés mécaniques en traction des éprouvettes fibres de cactus.

	Force (N)	Déplacement (mm)	Contrainte (MPa)	Déformation (%)
Eprouvette 1	156.98	0.63	6.28	0.42
Eprouvette 2	123.3	0.64	4.93	0.43
Eprouvette 3	206.46	0.88	8.26	0.58

III.2.3. Essais de traction sur résine

Les essais de traction sur la résine époxyde sont conduits dans les mêmes conditions que celles des éprouvettes de cactus et selon la norme ASTM D 5083.



Figure.III.5: Essai de traction sur l'éprouvette de résine.

L'évolution de la contrainte en fonction de la déformation de la résine époxy testée en traction statique est illustrée dans la figure III.6. Cette évolution se produit de manière quasi linéaire, les courbes obtenues des essais effectués montrent une variation de la contrainte à la rupture allant de 29.19 à 33.07 MPa, celle de la déformation à la rupture est de 2.02 à 2.22 %.

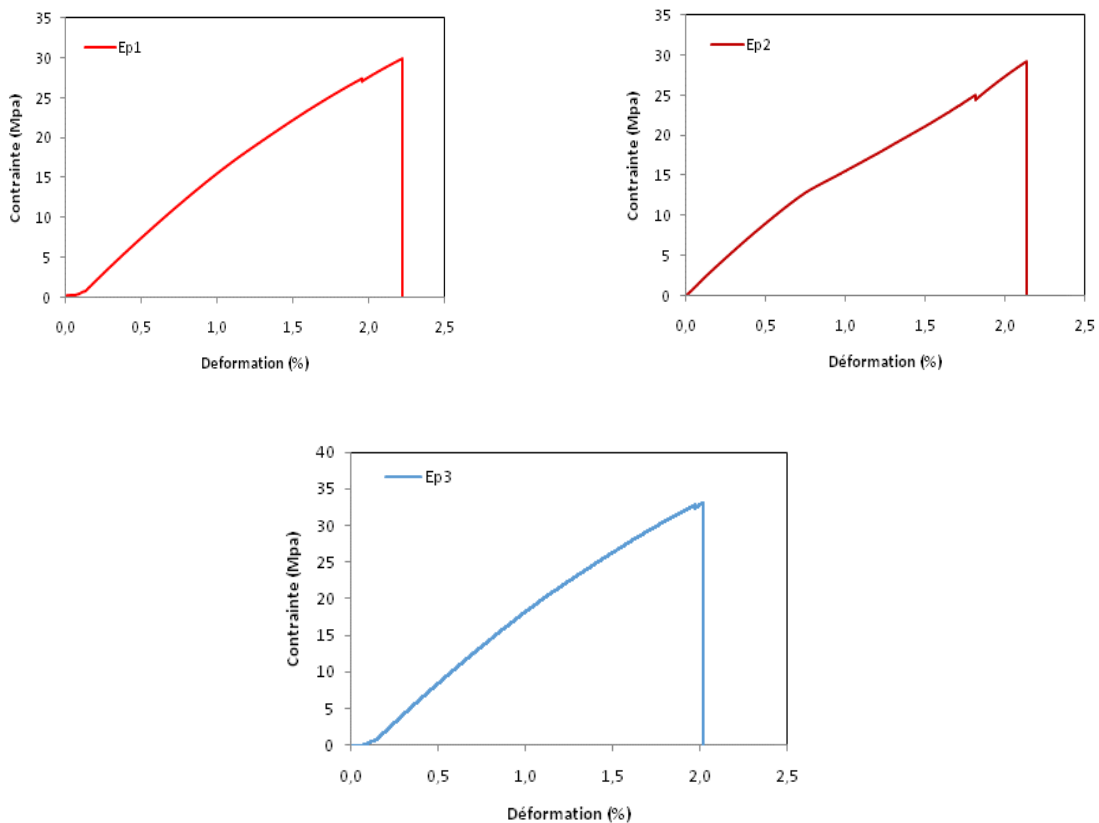


Figure.III.6 : Courbe contrainte-déformation de la résine.

Le tableau III.3 résume les valeurs maximales des propriétés des éprouvettes en résine époxyde testées. Bien que ces échantillons soient coupés d'une même plaque, les résultats obtenus se distinguent par des variations entre les différents échantillons testés. La dispersion observée est principalement causée par les dimensions des échantillons, mais elle peut également être directement liée à la répartition des cavités dans la matrice (bulles d'air).

Tableau III.3 : Propriétés mécaniques en traction des éprouvettes en résine.

	Force (N)	Déplacement (mm)	Contrainte (MPa)	Déformation (%)
Eprouvette 1	1993.54	3.34	29.98	2.22
Eprouvette 2	1941.22	3.20	29.19	2.13
Eprouvette 3	2015.75	3.03	33.07	2.02

III.2.4. Essais de traction sur le matériau bio composite

Les essais de traction sur le matériau biocomposite lin/cactus/lin ont été aussi conduits dans les même conditions que celles effectuées sur les éprouvettes de résine. Pour ce faire, des éprouvettes parallélépipédiques de 250 mm de longueur, 25 mm de largeur ont été découpées, selon la norme ASTM 5083.



Figure.III.7: Essai de traction sur composite lin/cactus/lin

La figure III.8 représente les courbes contrainte/déformation du composite lin/cactus/lin testée en traction statique. L'allure générale des courbes montre une croissance quasi linéaire jusqu'à la rupture brutale des éprouvettes.

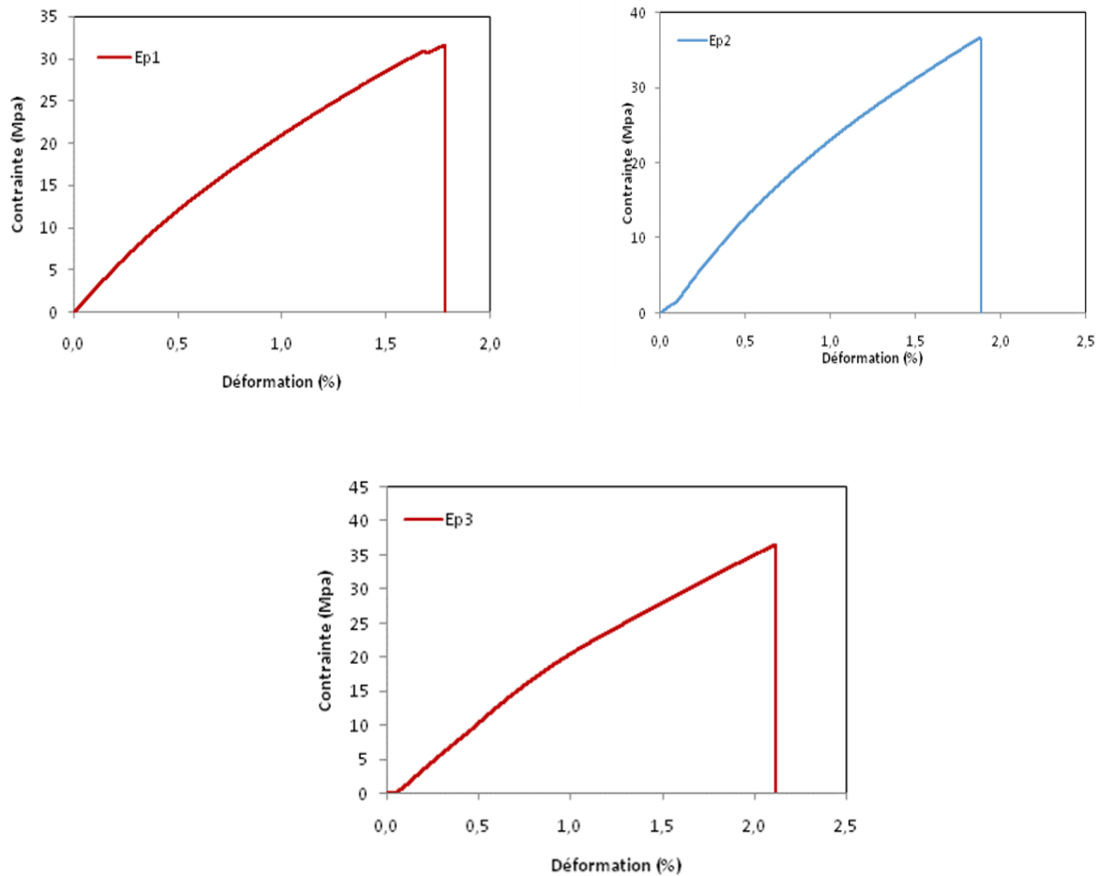


Figure.III.8: Courbe contrainte-déformation du composite lin/cactus/lin

Le tableau III.4 résume les valeurs maximales des propriétés des éprouvettes en composite lin/cactus/cactus testées. Des variations entre les différents échantillons testés sont observées, elles sont liées aux défauts de dimensionnement des échantillons, et aussi au procédé de fabrication des plaques composites.

Tableau III.4 : Propriétés mécaniques en traction des éprouvettes en composite lin/cactus/lin.

	Force (N)	Déplacement (mm)	Contrainte (MPa)	Déformation (%)
Eprouvette 1	2811,1	2,69	31,59	1,79
Eprouvette 2	3242,25	2,83	36,43	1,89
Eprouvette 3	3255,33	3,18	36,58	2,12

III.3. Conclusion

L'étude expérimentale en traction des deux types de fibres végétales ainsi que sur des bio-composites élaborés permet de déterminer les points suivants :

- ✚ A partir des essais de traction menés sur les deux types de fibres végétales, il a été constaté qu'elles sont anisotropes (les résultats sont très dispersés), ce qui confirme les travaux réalisés par d'autres auteurs dans le cas des fibres naturelles.
- ✚ Les résultats obtenus à partir d'essais de traction réalisés sur des bio-composites montrent que l'ajout de fibres de lin et de cactus dans la matrice permet d'améliorer les propriétés mécaniques du composite du fait de l'augmentation de la contrainte à la rupture.

Conclusion générale

Conclusion Générale :

Dans le monde de l'industrie, de l'ingénierie et de la mécanique, les matériaux utilisés jouent un rôle crucial dans la détermination de la résistance, de la durabilité et de la viabilité. Dans notre étude, nous nous concentrons sur les matériaux composites, en particulier ceux produits à partir de fibres végétales (lin et cactus), en explorant la façon dont ces technologies contribuent à améliorer la performance et l'efficacité des produits et à réaliser une révolution dans le monde industriel moderne. Lorsque nous parlons des matériaux composites à base de fibres végétales et que nous les comparons aux matériaux traditionnels tels que le fer, nous constatons que les avantages vont au-delà de la résistance et de la durabilité, car les renforts en fibres végétales offrent un large éventail d'avantages qui les rendent idéaux pour une utilisation pour un certain nombre de raisons :

Leur légèreté fait des renforts en fibres composites un bon choix pour réduire les charges et les contraintes, ce qui permet de réduire les coûts de transport et d'installation. En outre, la résistance élevée à la traction des fibres végétales composites offre une résistance exceptionnelle à la rupture et à la fissuration, ce qui augmente la durée de vie des structures et des pièces et réduit les besoins de maintenance et de réparation. De plus, la résistance à la corrosion, aux produits chimiques et aux conditions environnementales difficiles signifie que les fibres végétales composites constituent une solution durable dans les zones exposées à des influences environnementales telles que l'humidité et la haute pression, alors que les matériaux traditionnels tels que l'acier se corrodent au fil du temps.

Les propriétés isolantes des composites à base de fibres végétales en font des matériaux idéaux pour les appareils dont le fonctionnement nécessite des températures extrêmes, à la fois élevées et basses, ce qui permet de maintenir des températures stables et d'améliorer l'efficacité énergétique.

Ils sont également respectueux de l'environnement car ils réduisent l'empreinte carbone, nécessitent beaucoup moins d'énergie pour être produits que les matériaux traditionnels tels que l'acier, et sont entièrement recyclables, ce qui permet de minimiser les déchets et de soutenir l'économie mondiale.

Le travail présenté dans ce mémoire fait à l'objet de caractérisation mécanique de la fibre de lin et leur utilisation pour le renforcement des biocomposites. Les biocomposites lin/cactus élaborés sont testés sous chargement statique en traction. Les résultats ont été reportés sur une représentation graphique des résultats pour commentaire et étude.

Conclusion générale

Après tout, l'histoire des fibres est aussi ancienne que la civilisation humaine. On trouve des traces de fibres naturelles dans les anciennes civilisations du monde entier. Pendant des milliers d'années, la consommation de fibres naturelles telles que le lin, le coton, la soie, la laine et les fibres végétales a été limitée à divers usages. Le lin en particulier est la fibre la plus ancienne et la plus utilisée depuis l'Antiquité, et nous pensons que son utilisation se développera à l'avenir, d'autant plus que les scientifiques prévoient que l'homme se tournera de plus en plus vers les fibres naturelles dans l'industrie, pour la santé de l'homme et de son environnement et la grande disponibilité de nombreuses sources d'énergie non naturelles qui sont menacées de disparition. Après tout, l'histoire des fibres est aussi ancienne que la civilisation humaine. On trouve des traces de fibres naturelles dans les anciennes civilisations du monde entier. Pendant des milliers d'années, la consommation de fibres naturelles telles que le lin, le coton, la soie, la laine et les fibres végétales a été limitée à divers usages. Le lin en particulier est la fibre la plus ancienne et la plus utilisée depuis l'Antiquité, et nous pensons que son utilisation se développera à l'avenir, d'autant plus que les scientifiques prévoient que l'homme se tournera de plus en plus vers les fibres naturelles dans l'industrie, pour la santé de l'homme et de son environnement et la grande disponibilité de nombreuses sources d'énergie non naturelles qui sont menacées de disparition.

Références

Bibliographiques

- [1] A. Baloul, L. Bengorir , « Caractérisation des fibres végétales locales », Mémoire master, université A. Mira De Bejaia ,2021.
- [2] A.Oihdi, M.Mejdi, « recherche thématique sur les matériaux composites à matrice organique», recherche thématique Ecole hassania des travaux publics.
- [3] ر.بهمان ، «مقالة المواد المركبة» ، جامعة ديالي كلية العلوم ،العراق.
- [4] M.Tahee, « Etude de l'endommagement dans un composite stratifié » ,mémoire de magister université Iben badiss de mostaganem, 2012.
- [5] Chrétien G, « Matériaux Composites À Matrice Organique : Polymères Et Renforts Type, Caractéristiques, Technologies De Mise En Forme, Applications», Technique et documentation, 1986.
- [6] Y.Ledru, « Etude de la porosité dans les matériaux composites stratifiés aéronautiques » , Thèse de doctorat Institut National Polytechnique de toulouse ,2009.
- [7] خ.حسن. م. صالح. ه. الفاضل، «دراسة المواد المركبة من حيث أنواعها ، استخداماتها، مميزاتها و محدوداتها مقارنة بالمواد الكلاسيكية»، مشروع تخرج كمطلوب تكميلي لنيل درجة البكالوريوس مرتبة الشرف في الهندسة الميكانيكية ، 2016.
- [8] Mohanty, Amar K, Manjusri Misra, Lawrence T. Drzal, eds, « Natural fibers, biopolymers, and biocomposites», CRC press, 2005.
- [9] Baley, Christophe, «Fibres naturelles de renfort pour matériaux composites», Ed. Techniques Ingénieur, 2005.
- [10] C. Kuntz, « Ecoconception des solutions utilisées dans le cadre du génie écologique » , Centre de ressources Génie écologique de L'office français de la biodiversité (OFB) intitulé ,2019.
- [11] Mostar Abdessamed, « influence des ajouts de fins minérales sur les performances mécaniques des bétons renforcé de fibre végétales de palmier dattier », université de Kasdi Merbah Ouargla option génie civil, 2006.

Références Bibliographiques

- [12] C.Ververis, K.Georghiou, N.Christodoulakis, P. Santas, R.Santas, « Fiber dimensions, lignin and cellulose content of various plant materials and their Suitability for paper production», *Industrial Crops and Products*, vol (19), p 245-254, 2004.
- [13] Horn, Richard A, «Morphology of pulp fiber from hardwoods and influence on paper strength», *Res. Pap. FPL-312*. Madison, WI: US Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory journal, vol(312) , 1978.
- [14] Horn, Richard A., and Vance C. Setterholm , «Fiber morphology and new crops» , p270-275, 1990.
- [15] Dinwoodie, J. M, «The relationship between fiber morphology and paper properties: a review of literature»: 440-7, 1965 .
- [16] Ogonnaya, C. I., et al, «Physical and histochemical properties of kenaf (*Hibiscus cannabinus* L.) grown under water deficit on a sandy soil», *Industrial crops and products* (vol 7) , p 9-18, 1997.
- [17] A. Melle KHELASSI , « EUDE DU TRAITEMENT ALCALIN D'UN DECHET SOLIDE», mémoire DE FIN D'ETUDES, École Nationale Polytechnique,2014.
- [18] Faissal Chegiani, «Analyse multi échelle de l'usage des matériaux biosources : Application aux agrocomposites», *Ecole nationale supérieure d'arts et métiers - ENSAM*, Paris, 2016.
- [19] Martin, Nicolas André Michel. « Contribution à l'étude de paramètres influençant les propriétés mécaniques de fibres élémentaires de lin : Corrélation avec les propriétés de matériaux composites », *Université de Bretagne Sud*, 2014.
- [20] Netravali, Anil et Chabba, Shitij, «Composites get greener», *Materials Today - MATER TODAY journal*, vol (6), p22-29, 2003.
- [21] Nathan Mpiana Kibwela, «Étude comparative des propriétés mécaniques d'un matériau composite à matrice polymérique renforcé par les fibres végétales de bambou et de palmier dattier», mémoire de Master Ingénieur Civil en Chimie Industrielle ,2022.

- [22] Gautam, S. P, al, «A review on systematic study of cellulose», Journal of Applied and Natural Science, vol (2), p 330-343, 2010.
- [23] Brienzo, Michel, ed «Hemicellulose biorefinery: a sustainable solution for value addition to bio-based products and bioenergy», Springer Nature, 2022.
- [24] C. Baley, « Analysis of the flax fibers tensile behaviour and analysis of the tensile stiffness increase», Compos, Appl, Sci , Manuf , vol(33), p 939–948, 2002.
- [25] Abdellaoui, H., Bouhfid, R., Qaiss, A.E.K, «Lignocellulosic Fibres Reinforced Thermoset Composites: Préparation, characterization, mechanical and rheological properties», Lignocellulosic composite materials, 2018.
- [26] Belouadah, Z, et al, «Optimisation des méthodes d'extraction et caractérisation mécanique de la Fibre alfa en vue de son application comme renfort des matériaux composites», Journal of materials, processes and environment, vol(2), p 51-57, 2014.
- [27] Nouri, Mustapha, «Développement d'éléments en biocomposite à base de fibre végétale pour la réhabilitation énergétique des bâtiments Diss», École centrale de Nantes, 2020.
- [28] M.Gregoire, « Extraction des fibres de chanvre pour des composites structuraux -Optimisation du potentiel mécanique des fibres pour des applications concernant des matériaux composites 100% bio-sourcés », Thèse de doctorat Institut National Polytechnique de toulouse ,2021
- [29] Mark, H. F, « Encyclopedia of polymer science and technology», Wiley New York, NY, USA, (Vol 14), p 519-520, 2014.
- [30] M.Bourahli, «Caractérisation d'un composite verre / époxy », Thèse de doctorat université Ferhat Abbas-Sétif 1 L'Institut d'optique et Mécanique de Précision, 2014.
- [31] Shakyawar, D. B., L. K. Nayak, V. B. Shambhu, and N. T. Kumar, «Mechanization of nature fiber extraction and quality evaluation» In Lead paper published in 55th Annual Convention of Indian Society of Agricultural Engineers and International Symposium, p. 7-16, 2021.
- [32] Berthelot, Jean-Marie, « Matériaux composite», Lavoisier Paris, 2012.
- [33] <https://www.modelagecanada.com/moules-industriels> , 09-06-2024 17:40

Références Bibliographiques

- [34] M. Dallel, «Evaluation du potentiel textile des fibres d'Alfa (*Stipa Tenacissima* L.): Caractérisation physico-chimique de la fibre au fil», Université de Haute Alsace-Mulhouse, 2012.
- [35] M. Ragoubi, «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 1, 2010.
- [36] KC, Birat et Pervaiz, Muhammad and Faruk, Omar and Tjong, Jimi and Sain, Mohini, «Green composite manufacturing via compression molding and thermoforming», *Manufacturing of Natural Fibre Reinforced Polymer Composites Journal*, p45-63, 2015.
- [37] M. Abir, «Etude de la production et de la caractérisation de composites BoisPlastiques », Mémoire Maîtrise en génie chimique, Québec, Canada, 2013.
- [38] K. Rouam, «Elaboration, caractérisation mécanique et hygrothermique d'un stratifié renforcé par des fibres naturelles » , Mémoire de Magister Université mohammed bougera - Boumerdes,2014.
- [39] Nicolas Dujardin, « UN MATERIAU BIOSOURCE DE CHOIX : LES FIBRES NATURELLES CARACTÉRISATIONS ET APPLICATIONS », 25èmes Journées Scientifiques de l'Environnement - L'économie verte en question, Créteil, France, 2014.
- [40] Bouazizi, Souhir, et al , «Effects of prickly pear (*Opuntia ficus-indica* L.) peel flour as an innovative ingredient in biscuits formulation», *Lwt*, vol (124) p 109-155, 2020.
- [41] www.hexagraine.com/fr/page/guide-d-extraction-fibre-vegetale-de-lin-33, 28-05-2024, 20:30.
- [42] Mauseth, James D , « Structure function relationships in highly modified shoots of Cactaceae » , *Annals of Botany journal*, vol (98), p 901-926, 2006.