



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 de fin d'étude

Thème:

**Etude de comportement mécanique d'un bio-composite
renforcé par des déchets d'aliments pyrolysés**

Présenté par : Achit Romaisa et Fethallah Hadjer

Encadreur : Aziz Saaidia

Jury de Soutenance :

Nom et prénom	Grade	Etablissement	Role
Bensanaa toufik	MCA	Enset skikda	Président
Saaidia aziz	MCA	Enset skikda	Encadreur
Fnides mohamed	MCA	Enset skikda	Examineur

Année Universitaire : 2024/2025

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Dédicaces

*Je dédie ce mémoire
À moi-même,
Pour ma persévérance, ma force silencieuse et ma foi en l'accomplissement.
Ce travail est le reflet de mon engagement et de ma résilience.*

À mes chers parents

Ma mère, pour son amour, son soutien, ses sacrifices et ses conseils précieux.. Mon père, qui peut-être fier et trouver ici le résultat de longues années de sacrifices et de privations pour m'aider à avancer dans la vie.

*À ma chère sœur Soumia,
Merci pour ta tendresse, ta présence rassurante et ton soutien constant dans chaque étape de ce parcours.*

*À mes frères Rachid, Mohamed et Billal,
Pour votre affection fraternelle, vos encouragements sincères et votre confiance en moi.
Vous avez été une source de motivation et de force, même dans les moments les plus difficiles.*

*À mes petits anges, Acil et Lilian,
Votre innocence, vos sourires et votre lumière ont illuminé mes journées les plus chargées.
Vous êtes ma plus belle source d'inspiration, ma force et mon espoir.*

*À mon binôme Hadjer,
Pour ton engagement, ton soutien et ta précieuse collaboration tout au long de ce travail.
Merci pour ta présence à chaque étape de ce parcours.*

*À Lina, Mon amie de l'âme,
Pour ton amitié sincère, ton soutien et ta présence apaisante.
Avec toute ma gratitude.*

*À Houda, ma sœur,
Merci pour ton amour, ta complicité et ton soutien indéfectible.
Tu as été à mes côtés avec douceur et force, dans les moments de doute comme dans les réussites.*

*À Anfel, Safaa, Ikhlal et Sanaa,
Pour votre présence, votre soutien et votre amitié précieuse tout au long de ce parcours.
Avec toute ma gratitude.*

*À mes camarades, Meriem, Maroua, Chourouk, Razika, Jihan, Farida, Selsabil, Ranim, Soumia, Rania, Israa
Merci pour les échanges, les partages et les moments de solidarité vécus ensemble.
Votre présence a enrichi cette aventure humaine et académique.*

*À mes amis du chemin académique ,
Akrem, Aymen, Mohamed, Ahmed, Nouri, Sallah et tous les autres,
Merci pour votre camaraderie, votre entraide et les souvenirs partagés tout au long de cette aventure.
Vous avez rendu ce parcours plus léger, plus riche et plus humain.*



Ce mémoire est dédié à :

Mes chers parents :

*Ma mère **FARIDA**, qui a œuvré pour ma réussite, de par son amour, son soutien, tous les sacrifices consentis et ses précieux conseils, pour toute son assistance et sa présence dans ma vie, reçois à travers ce travail aussi modeste soit-il, l'expression de mes sentiments et de mon éternelle gratitude.*

*Mon père **CHERIFE**, qui peut être fier et trouver ici le résultat de longues années de sacrifices et de privations pour m'aider à avancer dans la vie.*

*À mes chères sœurs **RAHMA** et **ABIR**, Vous fûtes le miroir qui reflétait la pureté de mon âme, Le jardin où mes rêves s'épanouirent, bercés par votre lumière.*

Vous avez transformé ma vie en un poème d'amour infini, Mes soucis en fleurs, mes défis en leçons de vie.

*À mon frère **ISMAIL**, Pour ton amour fraternel inconditionnel, Tes encouragements sincères et cette confiance qui n'a jamais faibli...Tu as été la source intarissable de ma force, mon soutien indéfectible, même dans les moments les plus sombres et les épreuves les plus difficiles.*

*À mes petit sanges, **OUSSAID** et **FARAH**, Votre innocence, vos sourires et votre lumière ont illuminé mes journées les plus chargées. Vous êtes ma plus belle source d'inspiration, ma force et mon espoir.*

*À mon binôme **ROMAÏSSA**, Pour ton engagement, ton soutien et ta précieuse collaboration tout au long de ce travail. Merci pour ta présence à chaque étape de ce parcours.*

*À mes camarades, **wissal**, **Meriem**, **Romaïssa**, **Aya**, **Kelthoume**, **Maroua**, **Rania**, Merci pour les échanges, les partages et les moments de solidarité vécus ensemble. Votre présence a enrichi cette aventure humaine et académique.*

À mes amis du chemin académique, merci pour votre camaraderie, votre entraide et les souvenirs partagés tout au long de cette aventure. Vous avez rendu ce parcours plus léger, plus riche et plus humain.

Last but not least, I wanna thank me ,I wanna thank me for believing on me, I wanna thank me for doing all this hardwork, I wanna thank me for having no days off, I wanna thank me for never quitting, I wanna thank me for always being a giver and trying to give more than I receive, I wanna thank me for trying to do more right than wrong, I wanna thank me for just being me all time .



Remerciement

Avant tout développement sur cette expérience il apparait opportun de commencer ce travail par des remerciements

À ceux qui ont cru en nous (et à ceux qui nous ont soutenus dans les moments de doute)

Avant de clore ce mémoire qui nous a pris beaucoup de temps, nous souhaitons faire une pause pour exprimer notre profonde reconnaissance à tous ceux qui nous ont aidés à devenir la personne que nous sommes aujourd'hui. Merci pour votre soutien, votre patience et votre présence durant les moments de stress et d'anxiété que nous avons traversés.

À tous ceux qui nous ont beaucoup appris au cours des cinq dernières années, depuis les classes préparatoires jusqu'à l'école qui nous a accueillis pour "atteindre notre objectif principal : former ceux qui exerceront la noble profession de comptable".

À tous ceux qui ont contribué à rendre ce parcours fructueux : nos collègues, nos professeurs, l'équipe administrative de notre école.

Ce travail n'est pas seulement le fruit de nos propres efforts, mais nombreux sont ceux qui y ont contribué. Nous tenons particulièrement à mentionner :

Monsieur le Directeur "**Boudjeedar Djamel**", pour sa disponibilité constante, sa bienveillance et son encadrement tout au long de notre parcours. Son écoute et sa gestion ont contribué à créer un environnement favorable à notre réussite.

Je tiens à exprimer ma sincère gratitude à mon superviseur "**Saaidia Aziz**", pour sa patience, ses précieux conseils et sa confiance. Son accompagnement m'a permis de progresser et de mener à bien ce travail dans les meilleures conditions.

Un grand merci à Monsieur "**Isassefa Ibrahim**" et à Monsieur **Moadji** pour leur soutien technique, particulièrement dans la partie pratique, ainsi que pour leur réactivité et leur bonne humeur constante. Leur aide a été précieuse et très appréciée.

Je remercie également ******"le meilleur chef de département au monde", Monsieur "**Rahmouni Salih**", chef du département, pour sa présence, son professionnalisme et son suivi rigoureux. Son soutien a été d'une grande valeur durant cette dernière étape.

À mes parents "**Maman et Papa**", merci pour votre amour inconditionnel, vos prières silencieuses et votre confiance en moi. Votre soutien moral et vos sacrifices ont été ma source de force dans les moments les plus difficiles.

À mes frères et sœurs, merci pour votre compréhension, vos encouragements et votre chaleur. Vous avez toujours su alléger le poids des journées longues et éprouvantes.

À mes amis, qui ont partagé avec moi les rires comme les doutes, qui ont su écouter, conseiller ou simplement me distraire au bon moment : je vous suis profondément reconnaissante. Votre amitié a rendu ce chemin beaucoup plus humain et supportable.

Enfin, nous ne saurions terminer ces remerciements sans mentionner tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à notre réussite. Nous exprimons également notre gratitude aux membres du jury qui ont accepté d'évaluer ce travail.

Veillez trouver dans ces mots l'expression de notre profonde reconnaissance.

Résumé

Le choix d'un matériau composite est tributaire de son usage et des propriétés requises pour le produit ou l'application spécifique.

L'objectif principal était 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 largement utilisées (fibres synthétiques).

Ce travail vise à développer et caractériser un nouveau matériau bio-composite renforcé par des fibres de luffa et de bio charbon extrait des déchets de concombre, et d'évaluer la résistance de ce matériau en traction. Les bio composites élaborés sont des stratifiés obtenus par imprégnation dans une résine époxyde des fibres courtes de luffa et de bio-charbon en utilisant des pourcentages de 10% et 15 % de fibres de luffa et 1% et 2% de biochar.

Les résultats obtenus montrent que l'ajout de biochar aux composite luffa/époxy affecte les propriétés mécaniques du composite en diminuant la contrainte à la rupture et la déformation.

Mots clés : Bio-composite ; Luffa, bio-charbon, Résine époxyde, Traction

Summary

The choice of a composite material depends on its intended use and the required properties for a specific product or application.

The main objective was to protect the environment and nature from pollution and widespread diseases, and then to benefit as much as possible from new properties not available in widely used traditional fibers (synthetic fibers).

This work aims to develop and characterize a new bio-composite material reinforced with luffa fibers and biochar derived from cucumber waste, and to evaluate the tensile strength of this material. The developed bio-composites are laminates obtained by impregnating short luffa fibers and biochar in epoxy resin using 10% and 15% luffa fiber content and 1% and 2% biochar content.

The results obtained show that the addition of biochar to the luffa/epoxy composite affects the mechanical properties of the composite by decreasing the tensile strength and elongation at break.

Keywords: Bio-composite; Luffa; Biochar; Epoxy resin; Tensile test

ملخص

يعتمد اختيار مادة مركبة على استخدامها والخصائص المطلوبة للمنتج أو للتطبيق المحدد. كان الهدف الرئيسي هو حماية البيئة والطبيعة من التلوث والأمراض المنتشرة، ومن ثم الاستفادة قدر الإمكان من خصائص جديدة لا تتوفر في الألياف التقليدية المستخدمة على نطاق واسع (الألياف الاصطناعية). يهدف هذا العمل إلى تطوير وتوصيف مادة مركبة حيوية جديدة مدعمة بألياف اللوفا والبيو-فحم المستخلص من نفايات الخيار، وتقييم مقاومة هذه المادة للشد. المركبات الحيوية المُحضّرة عبارة عن صفائح مُركّبة تم الحصول عليها عن طريق تشريب ألياف اللوفا القصيرة والبيو-فحم في راتنج الإيبوكسي، باستخدام نسب 10% و15% من ألياف اللوفا و1% و2% من البيو-فحم. أظهرت النتائج أن إضافة البيو-فحم إلى مركب اللوفا/الإيبوكسي تؤثر على الخصائص الميكانيكية للمركب، من خلال تقليل الإجهاد عند الكسر والانفعال.

الكلمات المفتاحية: مركب حيوي؛ لوفا؛ بيو-فحم؛ راتنج إيبوكسي؛ اختبار الشد

Table des matières

<i>Introduction général</i>	2
<i>I.1 Introduction</i>	4
<i>I.2 Matériaux composites</i>	4
<i>I.2.1 Définition d'un matériau composite</i>	4
<i>I.2.2 Constituants des matériaux composites</i>	5
I.2.2.1 Renforts.....	5
I.2.2.2 Les matrices	6
<i>I.2.3 Types des matériaux composites</i>	6
<i>I.2.4 Matériaux bio composites</i>	7
<i>I.2.5 Fibres naturelles d'origine végétale</i>	8
I.2.5.1 Fibres de lin.....	8
I.2.5.2 Fibres de jute.....	8
I.2.5.3 Fibres de chanvre	8
I.2.5.4 Fibres de sisal.....	8
I.2.5.5 Fibres de coir (coco)	8
I.2.5.6 Fibres de luffa	8
I.2.5.7 Fibres de bambou	9
<i>I.2.6 Types de matrices utilisées avec les fibres végétales</i>	9
• I.2.10.1 Matrices thermodurcissables	9
• I.2.10.2 Matrices thermoplastiques.....	9
• I.2.10.3 Matrices biodégradables	9
• I.2.10.4 Matrice bio a extraite des plantes végétales	10
<i>I.2.7 Critères de sélection des matrices pour les fibres végétales</i>	10
<i>I.2.8 Avantages des matrices pour les fibres végétales</i>	11
<i>I.2.9 Morphologie de la fibre végétale</i>	11
<i>I.2.10 Composition chimique des fibres végétales</i>	13
• I.2.10.1 Cellulose	13
• I.2.10.2 Hémicellulose	14
• I.2.10.3 Lignine.....	15
• I.2.10.4 Lipides	15
• I.2.10.5 Pectines.....	16
• I.2.10.6 Protéines	16
<i>I.2.11 Techniques d'obtention des fibres végétales</i>	17
I.2.11.1 Rouissage chimique	17
I.2.11.2 Rouissage mécanique.....	18
<i>I.2.12 Techniques de mise en œuvre des matériaux à fibres végétales</i>	18
• I.2.12.1 Moulage au contact.....	18
• I.2.12.2 Moulage par injection.....	19
• I.2.12.3 Moulage par compression.....	19
• I.2.12.4 Moulage sous vide.....	20
• I.2.12.5 Moulage par transfert de résine (RTM- Raison Transfert Mödling)	21

I.2.13 Propriétés des matériaux à fibres végétales	21
I.2.13.1 Propriétés physiques	21
I.2.13.2 Propriétés mécaniques	22
I.2.14 Traitements des fibres végétales	23
I.2.14.1 Traitement physique	23
I.2.14.2 Traitement chimique	24
I.2.14.3 Traitement thermique.....	24
I.2.15 Applications des matériaux bio composites.....	24
I.2.16 Les avantages et les inconvénients de matériaux bio composites	26
• I.2.16.1 Les avantages.....	26
a Durabilité environnementale	26
b Légèreté et performance mécanique.....	26
c Propriétés thermiques et acoustiques.....	26
d Facilité de transformation et coût compétitif.....	27
e Polyvalence d'utilisation	27
f Conformité aux réglementations environnementales.....	27
• I.2.16.2 Les inconvénients	28
I.3 Conclusion.....	28
II.1 Introduction	30
II.2 Matériaux de l'étude et matériels utilisés.....	30
II.2.1 Fibre de Luffa	30
II.2.1.1 Définition	30
II.2.2 Déchet de concombre	32
II.2.2.1 Définition	32
II.2.2.2 Structure interne du concombre (Cucumis sativus).....	33
II.2.2.3 Propriétés physiques et mécaniques du concombre.....	34
II.2.3 La résine.....	35
II.2.4 Préparation du renfort.....	37
II.2.4.1 Fibre du Luffa	37
II.2.4.2 Le bio-charbon.....	37
II.2.5 Préparation des bio composites	39
• II.2.5.1 Préparation de la résine	39
II.2.5.2 Préparation des plaques bio composites	41
II.2.5.3 Préparation de la plaque en résine	42
II.2.6 Découpage des éprouvettes	43
II.2.7 Séchage des éprouvettes.....	44
II.2.8 Description de la machine de traction.....	45
II.3. Conclusion.....	47
III.1. Introduction.....	49
III.2. Résultats et discussions	49
III.2.1. Essais de traction sur les bio-composites et la résine époxyde.....	49
III.2.1.1 Essais de traction sur la résine époxyde.....	50
III.2.1.2 Essais de traction sur les bio-composites	51
• Bio composite contenant 10% de fibres.....	51

Tables des illustrations

• Bio composite contenant 15% de fibres.....	52
• Bio composite contenant 10% de fibres et 1% de biochar.....	53
• Bio composite contenant 10% de fibres et 2% de biochar.....	54
• Bio composite contenant 15% de fibres et 1% de biochar.....	55
• □Bio composite contenant 15% fibres et 2% de biochar	56
III.3. Conclusion.....	57
IV.Conclusion général.....	59

Table des figures

Figure I.1: Matériau composite.....	5
Figure I.2: les constituants de base d'un matériau composite.....	6
Figure I.3: classifications général du fibres naturelles	7
Figure I.4: structure de bois(observations multi échelles).....	12
Figure I.5: Modèle de description de la structure d'une fibre végétale.....	12
Figure I.6: schéma de la composition srstructurelle des fibres végétales	14
Figure I.7 : Dégradation microbienne de l'hemicelluloses(Enzymes, Étapes,Mécanismes).	14
Figure I.8 : Un exemple de structure de la lignine	15
Figure I.9: Structure d'une chaîne d'acide poly galacturonique et formation d'un coude par la presence de rhamnose	16
Figure I.10 : Les chaînesd'HRGP lié entre elles à l'aide de liaisons covalentes entre deux tyrosine	17
Figure I.11: moulage au contact.....	19
Figure I.12: méthodede projection simultanée	19
Figure I.13: méthode de moulage par compression.....	20
Figure I.14 : méthode du moulage sous vide.....	20
Figure I.15: principe du moulage par injection de résine	21
Figure I.16 : application des matériaux composites à base de fibres naturelles dans le domaine d'automobile.....	25
Figure I.17: application des matériaux composites à base de fibres naturelles dans le secteur de construction.....	26
Figure II.1: a) Plante de luffa et b) Faisceaux de fibres	31
FigureII.2: Structure de la fibre de luffa:a)coupe transversale b)coupe longitudinale.....	32
Figure II.3: Imagerie optique de la structure morphologique de la fibre de luffa:a)et b).....	32
Figure II.4: a)plante de concombre et b)fruit	33
Figure II.5: Coupe longitudinale et transversale du fruit de concombre	34
FigureII. 6: Résine utilisée:a)MEDAPOXY STR EA et b) MEDAPOXY STR EB	36
FigureII. 7: a)Fsisceau de fibres de lufa et b)Fibres courtes	37
Figure II.8 : a) Déchets collectés et b) Séchage à l'air libre.....	37
FigureII.9: a)Four de combustion avec déchets et b)déchets calcinés	38
FigureII.10: Broyage de déchets de concombre calcinés	38
FigureII. 11 : Pesage de la quantitéde fibres par plaque (g)	39
FigureII. 12: Préparationdu mélange(résine+durcisseur)	40
FigureII. 13: Préparationdu mélange(résine+durcisseur+biochar).....	41
FigureII.14: Elaboration des plaques composites luffa/epoxy/biochar:a)étalage préalable du moule par le mélange résine/biochar,b)dépôt de fibres ,c)re-étalage du mélange et d) dépôt de fibres résine/biochar,b).....	42
FigureII.15: Plaques composites obtenues :a)10% de luffa et 1% biochar et b)15% de luffa et 15% de luffa et 1% et 2% biochar.....	42
FigureII. 16: Elaboration de la plaque en résine:a) coulée de résine dans le moule et b)plaque obtenue	43
FigureII. 17: Tronçonneuse à disque diamanté utilisée pour le découpage des plaques bio composites	43

FigureII. 18: Éprouvette de traction :a)résine,b)10%luffa,15%luffa et 15% luffa et 1% biochar.....	44
FigureII. 19: a) Étuve et b)étuve avec éprouvette.....	44
FigureII. 20:Série des éprouvettes utilisées en traction	45
FigureII. 21:Machine de traction utilisée.....	45
FigureII.22: Essai de traction sur les bio composites.....	47
Figure III.1 Montage des éprouvettes sur la machine de traction.....	49
Figure III.2 Courbes contrainte-déformation de la résine.....	50
Figure III.3 Courbes contrainte-déformation luffa/époxy avec 10% de fibres.	51
Figure III.4 Courbes contrainte-déformation luffa/époxy avec 15% de fibres.....	52
Figure III.5 Courbes contrainte-déformation luffa/biochar/époxy avec 10% de fibres et 2% biochar.	
Figure III.6 : Courbes contrainte-déformation luffa/biochar/époxy avec 10% de fibres et 2% biochar.....	54
Figure III.7 : Courbes contrainte-déformation luffa/biochar/époxy avec 15% de fibres et 1% biochar.....	56
Figure III.8 : Courbes contrainte-déformation luffa/biochar/époxy avec 15% de fibres et 2% biochar.....	57

Table des tableaux

Table I.1: Propriétés morphologiques de quelques fibres végétales	13
Table I.2: Teneur en cellulose de quelques matières végétales	35
Table I.3: Caractéristiques physiques de quelques fibres végétales	35
Table I.4: Coefficient d'absorption d'eau de différents fibres végétales utilisées	36
Table I.5: Propriétés mécaniques de différents fibres végétales	39
Table II.1: Propriétés physico-chimique de la fibre de luffa	31
Table II.2: Propriétés physiques du concombre	35
Table II.3: Propriétés mécaniques du concombre.....	35
Table II.4: Propriétés de la résine epoxyde	36
Table II.5: Pourcentage des constituants par plaque bio-composite.....	39
Tableau III.1 : Propriétés mécaniques en traction des éprouvettes de résine seule.....	50
Tableau III.2 : Propriétés mécaniques en traction des éprouvettes luffa/époxy avec 10% de fibres.....	52
Tableau III.3 : Propriétés mécaniques en traction des éprouvettes luffa/époxy avec 15% de fibres.....	53
Tableau III.4 : Propriétés mécaniques en traction des éprouvettes luffa/époxy avec 10% de fibres et 1% biochar.....	54
Tableau III.5 : Propriétés mécaniques en traction des éprouvettes luffa/époxy avec 10% de fibres et 2% biochar.....	55
Tableau III.6 : Propriétés mécaniques en traction des éprouvettes luffa/époxy avec 15% de fibres et 1% biochar.....	56
Tableau III.7 : Propriétés mécaniques en traction des éprouvettes luffa/époxy avec 15% de fibres et 2% biochar.....	57

Liste des principaux symboles et abréviations

Abréviations

BTP : Bâtiment et Travaux Publics

CMP : Composite à matrice organique

CMM : Composite à matrice métallique

CMC : Composite à matrice céramique.

PVC : Polychlorure de vinyle.

HDPE : polyéthylène haute densité.

PLA : Acide Polylactique.

PHA : Polyhydroxyalkanoate

PP : Polypropylène

PA : Polyamide

MAF : un angle micro-fibrillaire

HRGP : Glycoprotéines Riche en Hydroxyproline

AG : ACIDE GRAS

PEG : Polyéthylène glycol

ASTM : SOCIÉTÉ AMÉRICAINE POUR LES ESSAIS ET LES MATÉRIAUX

Lloyd Instruments/Ametek EZ20 : machine de traction

RTM: moulage par transfert de résine

STREA : résine

NaOH : Hydroxyde de sodium

Na₂S : sulfure de sodium

OH⁻ : les anions d'hydroxyde

SH⁻ : sulfure

Symboles

F: la force (N)

S: la section de l'éprouvette (mm²)

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)

\mathcal{E} : la déformation (%).

Introduction générale

Introduction générale

Dans un contexte mondial marqué par la recherche de solutions durables et respectueuses de l'environnement, les matériaux composites biosourcés émergent comme une alternative prometteuse aux composites conventionnels à base de fibres synthétiques. L'intégration de déchets agricoles dans la fabrication de bio-composites ouvre de nouvelles perspectives en matière de valorisation des ressources naturelles inexploitées, tout en réduisant l'empreinte carbone des matériaux industriels.

Les déchets issus de l'agriculture représentent une source abondante et peu coûteuse de biomasse. Ces déchets, lorsqu'ils sont soumis à un processus de pyrolyse, acquièrent des propriétés spécifiques, telles qu'une porosité élevée et une meilleure stabilité thermique, les rendant particulièrement adaptés comme renforts pour les matrices polymères. Ainsi, l'utilisation de ces déchets sous forme de fibres ou de poudre (calcinés) dans la conception de bio-composites permet non seulement de valoriser des sous-produits agricoles, mais également de développer des matériaux légers, durables et respectueux de l'environnement avec des propriétés mécaniques spécifiques.

Ce travail vise à étudier le comportement mécanique d'un bio-composite renforcé par des fibres de luffa et des déchets de concombre pyrolysés. L'objectif principal est de caractériser les propriétés mécaniques du matériau résultant, notamment en termes de rigidité et résistance à la traction. Ces études permettront d'évaluer l'efficacité de ces déchets pyrolysés en tant que renforts, ainsi que leur potentiel dans des applications industrielles variées.

Au-delà de l'introduction générale et de la conclusion générale, le manuscrit se compose de trois chapitres :

Le premier chapitre présente une analyse du concept général des matériaux bio-composites, en mettant l'accent sur leurs caractéristiques qui en font une alternative prometteuse aux matériaux traditionnels, tels que les fibres synthétiques. Une attention particulière est accordée aux types de matériaux bio-composites utilisant des composants naturels et renouvelables, tels que les déchets agricoles. Le chapitre aborde également les applications de ces matériaux dans diverses industries telles que la construction, l'automobile et l'électronique, en soulignant leurs avantages, tels que leur légèreté, leur résistance élevée et leur faible impact environnemental par rapport aux matériaux traditionnels. De plus, le développement récent de l'utilisation des déchets agricoles dans la fabrication de ces matériaux sont explorés, ouvrant de nouvelles perspectives pour l'exploitation des ressources naturelles inexploitées.

Introduction Générale

Le deuxième chapitre expose les techniques et le matériels utilisés pour l'élaboration des plaques bio-composites de différentes taux de fibres et de bio-charbon, ainsi que la machine de caractérisation.

Le troisième chapitre présente l'analyse des résultats obtenus à partir des tests mécaniques en traction statique réalisés sur les bio-composites préparés par des déchets agricoles pyrolysés.

Chapitre I:

Etude bibliographique

I.1 Introduction

Au sens large, le terme « composite » désigne un matériau constitué de deux ou plusieurs composants distincts. Depuis l'Antiquité, l'homme a développé des matériaux composites en combinant des substances aux propriétés différentes afin d'obtenir des caractéristiques spécifiques, s'inspirant de modèles naturels comme les os (alliant la résistance des fibres de collagène et la légèreté de la matrice minérale d'apatite) ou le bois (flexible mais robuste grâce à son réseau de fibres de cellulose liées par une matrice d'hémicellulose et de lignine).[56]

Les années 1940 ont vu émerger les composites renforcés de fibres, dont le développement n'a cessé de progresser en raison de leurs performances mécaniques supérieures et de leur faible densité. Leur excellent rapport coût-efficacité a élargi leurs applications dans divers secteurs tels que l'aérospatial, l'automobile, le BTP, l'ameublement, etc. [57]

Cependant, malgré leur potentiel prometteur, ces matériaux font face à des défis, notamment environnementaux et sanitaires, particulièrement en fin de vie pour les composites traditionnels à fibres de verre ou de carbone. Ce qui a motivé l'exploration d'alternatives durables comme les fibres naturelles.[58]

I.2 Matériaux composites

I.2.1 Définition d'un matériau composite

Un matériau composite se distingue des matériaux traditionnels macroscopiquement homogènes. Il s'agit d'une combinaison de deux ou plusieurs matériaux de natures différentes, qui une fois assemblés, offrent des propriétés mécaniques globales supérieures à celles des matériaux individuels.[1]

En général, les matériaux composites se caractérisent par la présence d'une ou plusieurs phases discontinues **Figure (I.1)** réparties de manière homogène dans une phase continue. La phase discontinue est souvent constituée de particules ou de fibres, appelées renforts, qui possèdent des propriétés mécaniques nettement supérieures à celles de la phase continue. Cette dernière, appelée matrice, est généralement composée de résines telles que le polyester ou l'époxy.[2]

La matrice joue un rôle essentiel en maintenant la cohésion entre les éléments du renfort et en permettant la transmission des contraintes, conférant ainsi au matériau composite ses performances mécaniques optimales.[3]

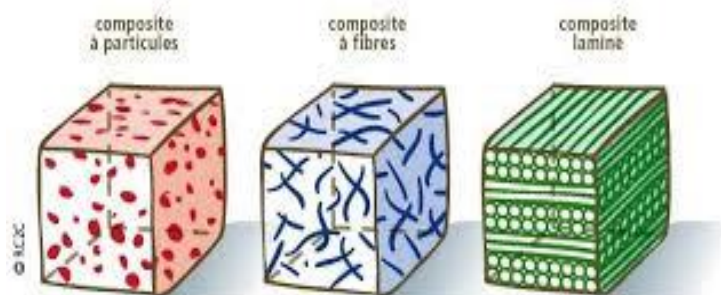


Figure (I.1) : Matériau composite.[59]

I.2.2 Constituants des matériaux composites

I.2.2.1 Renforts

Les renforts constituent les éléments structuraux principaux des matériaux composites, leur conférant des performances élevées telles que la rigidité et la résistance à la rupture. Les propriétés recherchées pour ces renforts incluent des caractéristiques mécaniques élevées, une faible densité, une bonne compatibilité avec la matrice de résine, une facilité de mise en œuvre, ainsi qu'un coût réduit [3]. La concentration des renforts joue un rôle crucial dans les propriétés finales du matériau composite. Cette concentration est généralement exprimée en fraction volumique ou massique, et se situe habituellement entre 0,3 et 0,7.[4]

L'anisotropie, caractéristique essentielle des matériaux composites, est déterminée par l'orientation des fibres, lorsque le renfort est constitué de fibres. Toutefois, au-delà de la concentration et de l'orientation des renforts, leur répartition plus ou moins homogène impacte également la résistance du composite. Une distribution uniforme garantit une homogénéité du matériau, tandis qu'une répartition non uniforme peut favoriser l'apparition de ruptures dans les zones appauvries en renfort, entraînant ainsi une diminution de la résistance globale du composite.[5]

I.2.2.2 Les matrices

La matrice est composée de résine mélangée à une charge, afin d'améliorer ses propriétés tout en facilitant sa mise en œuvre et en réduisant le coût de production. Ce mélange est considéré mécaniquement comme une phase homogène, formant ainsi un matériau composite constitué d'un renfort et d'une matrice.[6]

La matrice joue un rôle essentiel en assurant la liaison entre les fibres et en transmettant les efforts mécaniques. Elle contribue à la résistance du matériau dans la

direction transverse au renfort, tout en offrant une protection physico-chimique aux fibres contre les agents environnementaux nocifs. En outre, la matrice détermine directement la tenue thermique du matériau ainsi que sa résistance à la compression et au cisaillement interlaminaire.[7]

Les résines utilisées doivent posséder une bonne déformabilité et être compatibles avec les fibres, tout en présentant une faible densité pour maintenir des caractéristiques mécaniques spécifiques élevées au matériau composite. On distingue principalement grandes catégories de résines polymériques : les résines thermoplastiques et les résines thermodurcissables.[8]

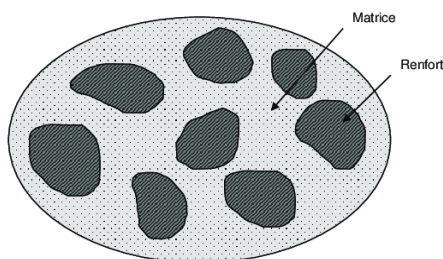


Figure (I.2) : Les deux constituants de base d'un matériau composite.[60]

I.2.3 Types des matériaux composites

La classification des composites selon la nature des matériaux constituant leur matrice permet de distinguer trois grandes catégories, classées ici par ordre croissant de résistance à la température: les composites à matrice polymère (CMP), les composites à matrice métallique (CMM) et les composites à matrice céramique (CMC). Ces matrices peuvent intégrer deux types de renforts : des renforts discontinus, dont les dimensions sont largement inférieures à celles de la pièce, ou des renforts continus, au moins équivalents en taille à la pièce.[9]

Concernant les composites à matrice polymère (CMP), deux types de matrices sont utilisés :

- Les résines thermodurcissables, telles que l'époxy, le polyester, le conférant et le polyuréthane, qui représentent environ 75 % des matériaux CMP actuels.
- Les résines thermoplastique, comme le polypropylène et le polyamide, utilisées dans une moindre mesure.

Les CMP sont principalement adaptés à des températures inférieures à 200 °C. Pour des applications à températures plus élevées, les composites à matrice métallique (CMM) sont privilégiés.[6]

I.2.4 Matériaux bio composites

Les matériaux bio-composites sont des matériaux biosourcés, la matrice est constituée de polymères issus de ressources renouvelables, tels que le PVC, le polyuréthane ou le polypropylène. Ces composites se distinguent par l'utilisation d'un renfort en fibres naturelles, d'origine végétale ou animale. Parmi les exemples courants, on trouve les copeaux de bois, les fibres de bambou, la cellulose et les coques de noix de coco.[10]

Cette combinaison unique confère aux composites biosourcés des propriétés écologiques et performantes, leur valant également les appellations de matériaux agricoles ou agro-composites.[11]

Les composites à fibres naturelles sont des matériaux composés d'une matrice polymère et de fibres d'origine végétale ou animale, offrant une alternative durable aux composites à fibres synthétiques. Grâce à leurs avantages écologiques et leur faible empreinte carbone, ces matériaux sont utilisés dans des secteurs variés tels que l'automobile, la construction, l'aérospatiale et l'électronique.[12]

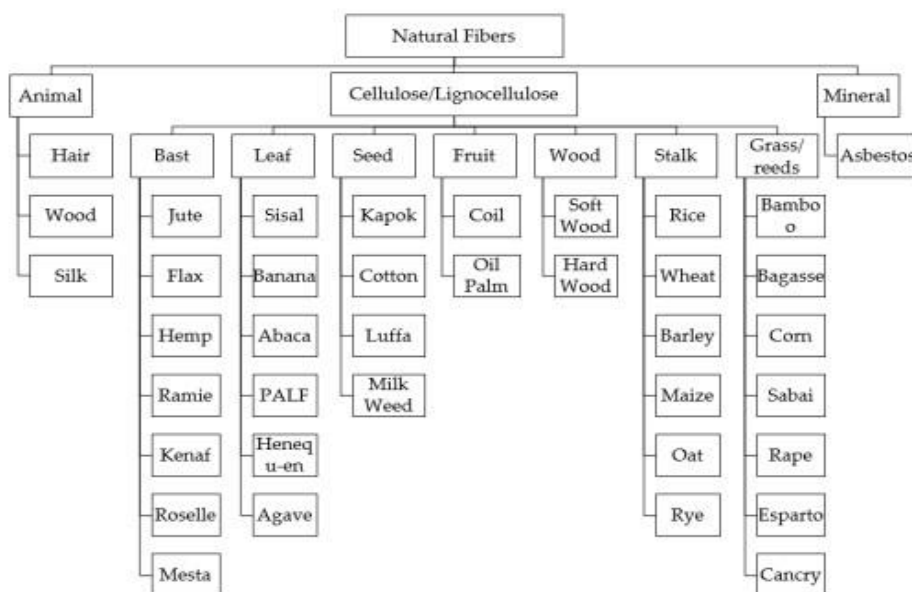


Figure (I.3):Classification général de fibres naturelle.[13]

I.2.5 Fibres naturelles d’origine végétale

Les renforts à base de fibres végétales sont utilisés dans la fabrication de matériaux composites pour améliorer leurs propriétés mécaniques, comme la résistance, la rigidité et la durabilité [29]. Ces renforts sont principalement constitués de fibres issues de différentes plantes, et

leur utilisation dans les composites permet de créer des matériaux à la fois légers, robustes et respectueux de l'environnement. Voici les principales fibres végétales utilisées comme renforts : [30]

I.2.5.1 Fibres de lin

Le lin est l'une des fibres végétales les plus populaires pour les renforts dans les composites. Elle présente une excellente résistance mécanique et une faible densité, ce qui la rend idéale pour des applications nécessitant des matériaux légers mais robustes, comme dans l'industrie automobile et l'aérospatiale.[31]

I.2.5.2 Fibres de jute

Le jute est une fibre végétale abondante et peu coûteuse, souvent utilisée dans des applications où le coût est un facteur important. Bien qu'elle soit moins résistante que le lin, elle offre de bonnes propriétés pour les matériaux d'emballage, les textiles et certains composants de construction.[32]

I.2.5.3 Fibres de chanvre

Les fibres de chanvre sont connues pour leur solidité, leur légèreté et leur résistance. Elles sont utilisées dans des applications automobiles et de construction, notamment pour la fabrication de panneaux, de revêtements et de matériaux d'isolation. [33]

I.2.5.4 Fibres de sisal

Les fibres de sisal, extraites des feuilles de l'agave, sont particulièrement adaptées aux composites nécessitant une grande résistance à l'usure et aux contraintes mécaniques. Elles sont utilisées dans les industries de la construction et des matériaux de renforcement.[34]

I.2.5.5 Fibres de coir (coco)

Les fibres de coir, provenant de la coque des noix de coco, sont très résistantes à l'humidité, ce qui les rend idéales pour des applications extérieures. Elles sont souvent utilisées dans les matériaux composites pour les secteurs de l'automobile et de la construction.[35]

I.2.5.6 Fibres de luffa

La fibre de luffa provient du fruit de la plante *Luffa aegyptiaca*, récolté, séché, puis transformé en une fibre spongieuse. Utilisée principalement pour les éponges naturelles, elle est aussi employée dans l'isolation et les produits cosmétiques. Écologique et biodégradable, elle constitue une alternative aux matériaux synthétiques.[36]

I.2.5.7 Fibres de bambou

Le bambou est une fibre végétale durable et renouvelable, utilisée dans la fabrication de composites pour des applications nécessitant une grande résistance et légèreté, comme dans l'industrie du mobilier et de la construction.[37]

I.2.6 Types de matrices utilisées avec les fibres végétales

I.2.10.1 Matrices thermodurcissables

Les matrices thermodurcissables sont des polymères qui durcissent irréversiblement sous l'effet de la chaleur, formant des réseaux rigides et robustes. Ces matrices sont souvent utilisées dans les composites à fibres végétales pour des applications nécessitant une grande stabilité thermique et chimique.[42]

- **Epoxy** : Très utilisée en raison de ses excellentes propriétés mécaniques et de sa résistance à la corrosion.[43]
- **Polyester** : Couramment utilisée dans les composites de construction et d'automobile, bien que moins performante que l'époxy en termes de résistance thermique et chimique.[43]
- **Vinylester** : Elle combine des propriétés intermédiaires entre l'époxy et le polyester, offrant une meilleure résistance à l'humidité.[43]

I.2.10.2 Matrices thermoplastiques

Les matrices thermoplastiques sont des polymères qui peuvent être ramollis et remoulés sous l'effet de la chaleur. Elles offrent une grande flexibilité et peuvent être traitées à des températures plus faibles que les thermodurcissables. Ces matrices sont moins rigides mais sont de plus en plus utilisées pour leur facilité de traitement et leur recyclabilité.[44]

- Exemples de matrices thermoplastiques :

- **Polypropylène (PP)** : Couramment utilisée dans les composites légers pour l'automobile, offrant une bonne résistance chimique et une facilité de moulage.[44]
- **Polyéthylène haute densité (HDPE)** : Utilisé pour des applications dans des conditions moins exigeantes, comme les matériaux de construction.[44]
- **Polyamide (PA)** : Offrant de bonnes propriétés mécaniques et une résistance thermique, souvent utilisé pour des applications automobiles.[44]

I.2.10.3 Matrices biodégradables

Avec la montée de la conscience écologique, les matrices biodégradables à base de polymères d'origine naturelle sont de plus en plus recherchées. Ces matrices sont utilisées pour des applications où la durabilité et l'impact environnemental sont des facteurs clés. Elles

sont souvent dérivées de ressources renouvelables, comme les amidons ou les acides organiques.[41]

- Exemples de matrices biodégradables :

- **Poly-lactides (PLA)** : Ce polymère biodégradable est utilisé dans des composites destinés à des applications temporaires ou jetables, comme les emballages ou certains produits agricoles.[44]
- **Acide poly-lactique (PHA)** : De plus en plus populaire pour ses propriétés biodégradables et renouvelables, souvent utilisé dans les applications agricoles et les produits de consommation.[26, 41]

I.2.10.4 Matrice bio a extraite des plantes végétales

Une matrice biologique issue de plantes végétales désigne généralement un ensemble de composés biochimiques extraits du matériel végétal. La composition de ces matrices varie en fonction des espèces végétales et des techniques d'extraction employées. Voici les principales caractéristiques et éléments constitutifs possibles : [7] [62]

Composants caractéristiques d'une matrice bio végétale

Métabolites primaires :

- Glucides : sucres simples, amidon, cellulose.
- Protéines et acides aminés.
- Lipides : huiles essentielles ou graisses.

Métabolites secondaires :

- Alcaloïdes : utilisés dans les médicaments et comme toxines.
- Phénols et flavonoïdes : puissants antioxydants.
- Tanins : reconnus pour leurs propriétés anti-inflammatoires.
- Terpènes : présents dans les arômes et les huiles essentielles.

Fibres :

- Surtout composées de cellulose, lignine et hémicellulose.

Minéraux et vitamines :

- Fournissent des nutriments biodisponibles.

I.2.7 Critères de sélection des matrices pour les fibres végétales

- **Compatibilité avec les fibres végétales** : La matrice doit adhérer correctement aux fibres végétales pour assurer une bonne transmission des charges et des propriétés mécaniques optimales.[26]

- **Propriétés mécaniques** : La résistance, la rigidité, la flexibilité et la stabilité thermique de la matrice sont des critères déterminants en fonction de l'application finale du composite.[27]
- **Résistance chimique et à l'humidité** : Certaines matrices offrent une meilleure résistance aux conditions environnementales, comme l'humidité ou les produits chimiques, ce qui peut être crucial pour l'utilisation de composites à base de fibres végétales dans des conditions extrêmes.[26, 41]
- **Facilité de fabrication** : La matrice doit être facile à manipuler et à mettre en œuvre, en particulier dans les processus de fabrication comme le moulage par injection, la compression ou la fabrication à chaud.[26][29]

I.2.8 Avantages des matrices pour les fibres végétales

- **Respect de l'environnement** : L'utilisation de matrices biodégradables ou de thermoplastiques permet de réduire l'empreinte écologique des composites à fibres naturelles, offrant ainsi une alternative plus verte aux matériaux traditionnels.[8]

- **Recyclabilité** : Les matrices thermoplastiques permettent une plus grande recyclabilité des composites, ce qui contribue à la durabilité et à la gestion des déchets.[7]

- **Propriétés améliorées** : Les matrices modernes peuvent être adaptées pour offrir des performances mécaniques similaires à celles des matériaux composites à base de fibres synthétiques, tout en étant plus respectueuses de l'environnement.[7]

Défis des matrices pour les fibres végétales

- **Compatibilité limitée** : La liaison entre les fibres végétales et certaines matrices peut poser problème, en raison de la différence de polarité entre les fibres naturelles et les polymères synthétiques.[8]

- **Durabilité et résistance** : Bien que les matrices naturelles et biodégradables soient respectueuses de l'environnement, elles peuvent parfois être moins résistantes aux conditions extrêmes, ce qui limite leur utilisation dans certaines applications industrielles.[18]

I.2.9 Morphologie de la fibre végétale

La fibre végétale agit comme un renfort constitué de couches de microfibrilles cellulosiques partiellement cristallines. Ces microfibrilles sont enveloppées dans une matrice amorphe composée de polysaccharides (hémicellulose et pectine) et liées à la lignine par des interactions hydrogène et des liaisons covalentes.[26]

La structure de la fibre végétale se compose de plusieurs parois alignées parallèlement à son axe et disposées en couches superposées dans le sens radial. Ces couches comprennent la lamelle mitoyenne, la paroi primaire et la paroi secondaire, qui entourent un lumen dont le diamètre varie

selon l'espèce. La paroi secondaire, à son tour, est formée de trois sous-couches de microfibrilles (S1, S2, S3).[27]

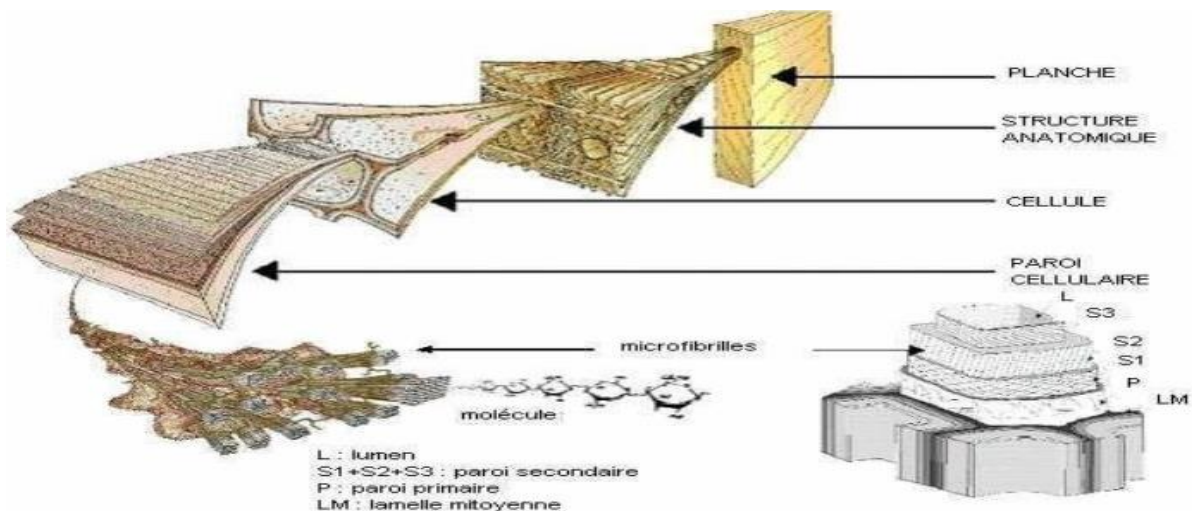


Figure (I.4) : Structure du bois (observations multi échelles).[27]

Les microfibrilles forment, par rapport à l'axe de la fibre, un angle micro-fibrillaire (MAF) dont la valeur varie selon les espèces. L'orientation des microfibrilles par rapport à l'axe de la cellule joue un rôle déterminant dans les propriétés mécaniques des parois des fibres. En effet, plus l'angle micro-fibrillaire augmente, plus le module de Young (indicateur de la rigidité) diminue, tandis que l'extensibilité des parois s'accroît.[38]

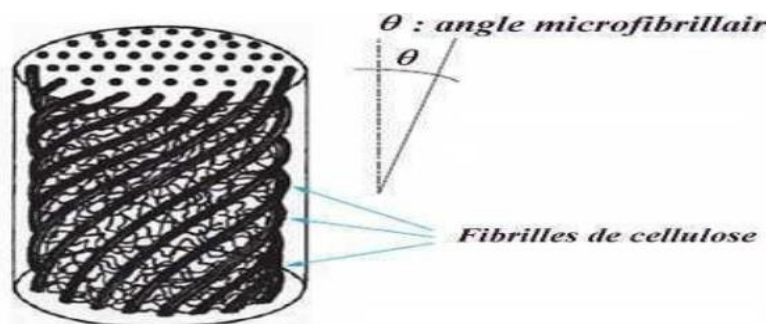


Figure (I.5) : Modèle de description de la structure d'une fibre végétale.[61]

La morphologie des fibres végétales dépend de divers facteurs influençant leurs dimensions. Elle varie selon l'origine de la biomasse, les conditions de croissance de la plante et son degré de maturité. Les variations du diamètre et de la longueur de la paroi des fibres végétales sont des éléments clés pour comprendre les transferts de contraintes aux interfaces fibre-matrice. Le tableau ci-dessous illustre les caractéristiques morphologiques de certaines fibres végétales.[28]

Tableau I.1 : Propriétés morphologiques de quelques fibres végétales.[28][31]

Fibres	Langueur (mm)	Diamètre (mm)
Coton	25	12-25
Lin	4-8.5	12-30
Jute	2.5	5-25
Sisal	100-125	100-400
Chanvre	5-40	16-50
Kènaf	2.5-4.5	14-33

I.2.10 Composition chimique des fibres végétales

Les fibres végétales se distinguent par leur composition chimique, qui influence considérablement leur durabilité, notamment dans des environnements alcalins. Cette composition chimique est principalement constituée de divers éléments lignocellulosiques et organiques : [29]

I.2.10.1 Cellulose

La cellulose constitue l'élément principal de toutes les fibres végétales. Il s'agit d'un polymère de condensation linéaire formé d'unités de glucose reliées par des liaisons glycosidiques β (1-4) (voir Figure). Sa structure moléculaire, responsable de son organisation supramoléculaire, joue un rôle déterminant dans de nombreuses propriétés chimiques et physiques. Les propriétés mécaniques des fibres naturelles varient en fonction du type de cellulose et de son agencement en spirale, car chaque type possède une géométrie cellulaire spécifique. Ces configurations géométriques influencent directement les caractéristiques mécaniques. La cellulose solide adopte une structure microcristalline, composée de régions hautement ordonnées, dites cristallines. Plus le degré de cristallinité de la cellulose augmente, plus la résistance mécanique des fibres s'améliore également. [14]

Tableau I.3 : Teneur en cellulose de quelques matières végétales. [44]

Espace végétales	Teneur en cellulose (%)
<i>Coton</i>	95-99
<i>Lin</i>	70-75
<i>Bambou, bois, paille</i>	40-50
<i>Maïs</i>	17-20

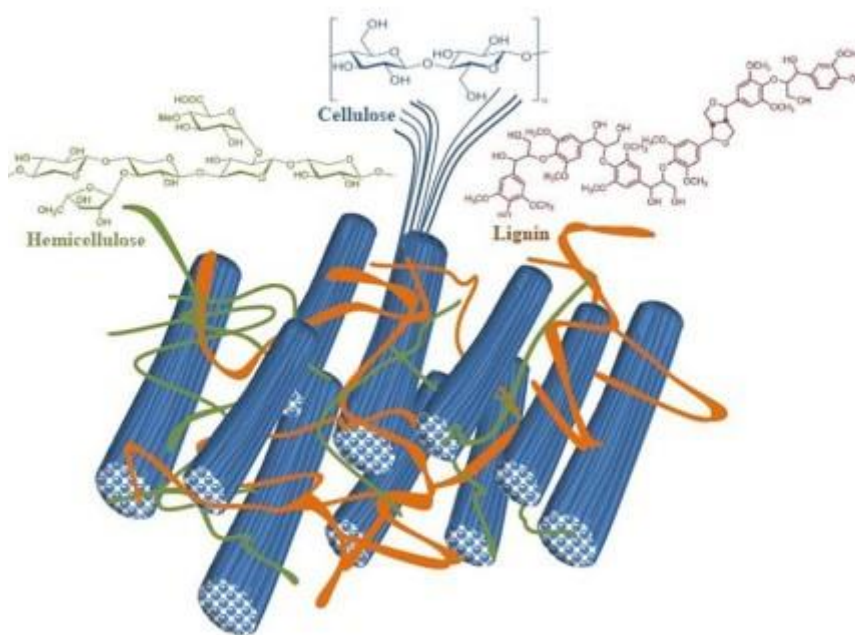


Figure (I.6) : schéma de la composition structurelle des fibres végétales.[63]

I.2.10.2 Hémicellulose

L'hémicellulose est constituée de polysaccharides présentant un degré de polymérisation inférieur à celui de la cellulose. Sa structure, bien qu'analogue à celle de la cellulose, est composée de sucres formant des chaînes de 5 à 6 unités. Cependant, ces chaînes sont relativement plus courtes et moins régulières que celles de la cellulose. Les hémicelluloses, très hydrophiles, se dégradent facilement par hydrolyse lorsqu'elles sont exposées à des acides ou des bases dilués.[27]

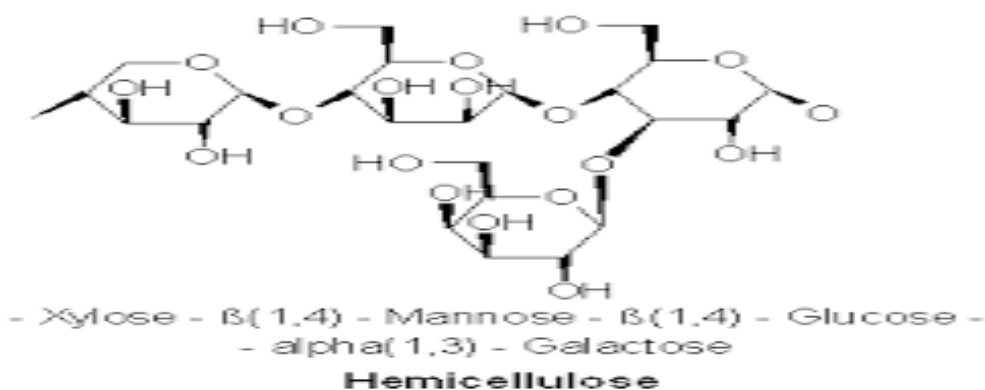


Figure (I.7) : Dégradation microbienne de l'hémicellulose (Enzymes, Étapes, Mécanismes).

[64]

I.2.10.3 Lignine

Lignine est un polymère aromatique hétérogène de poids moléculaire élevé, présent dans les tissus secondaires des plantes supérieures. Elle est constituée de monomères de type phénylpropane. Les trois cycles aromatiques les plus courants dans sa structure sont les alcools coniférylique, coumarinique et sinapylique. La lignine forme un réseau tridimensionnel qui s'intègre dans la matrice polyosidique, rendant ainsi la paroi cellulaire imperméable et résistante aux attaques microbiennes. [12, 45]

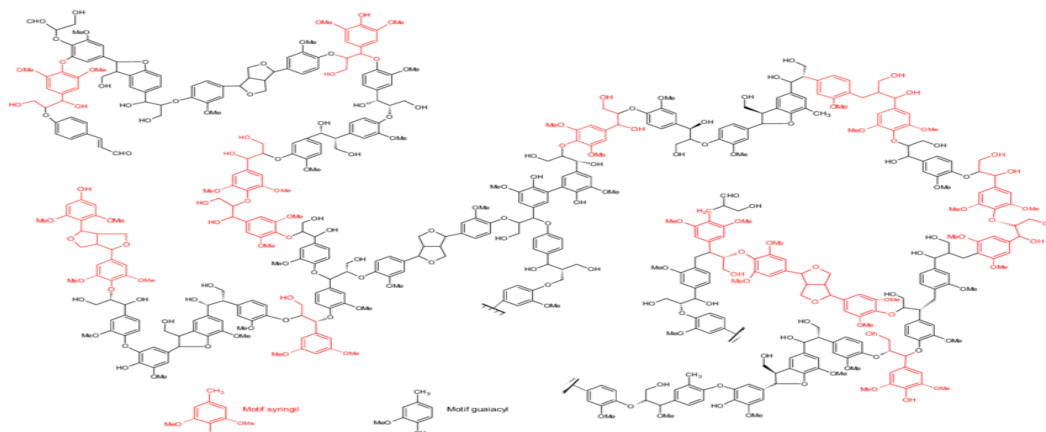


Figure (I.8): Un exemple de structure de la lignine.[65]

I.2.10.4 Lipides

Les lipides sont des composés organiques principalement constitués de matières grasses, d'esters et de dérivés d'acides gras (AG), qui partagent des propriétés physiques similaires, telles que la solubilité. Ils sont généralement insolubles ou peu solubles dans l'eau, mais se dissolvent facilement dans des solvants organiques non polaires comme le méthanol, le chloroforme, ou le cyclohexane. Les termes "huiles", "beurres", "graisses" et "cires" font référence à leur état physique (liquide ou solide) à température ambiante.

Un lipide peut être :

- Complètement apolaire (lipide neutre)
- Bipolaire, c'est-à-dire une molécule amphiphile (ou amphipathique), avec une tête polaire et une queue fortement apolaire (chaîne hydrocarbonée).
- Les lipides naturels jouent plusieurs rôles essentiels dans les organismes vivants, tels que :

Réserves intracellulaires d'énergie

- Matériaux de structure, notamment dans la formation des membranes biologiques et les couches de protection des cellules.

Les lipides se divisent en deux grandes catégories :

- Les lipides simples, tels que les cires et les stérides
- Les lipides complexes, incluant les glycérophospholipides, les glycérolyolipides et les sphingolipides. [45]

I.2.10.5 Pectines

Les pectines sont des polysaccharides acides dont la chaîne principale est constituée de monomères d'acide uronique reliés par des liaisons 1-4. Des molécules de rhamnose s'insèrent régulièrement entre ces monomères par des liaisons 1-2 et 1-4. Certaines unités de rhamnose possèdent des chaînes latérales composées de sucres neutres, parmi lesquels le galactose et l'arabinose sont les plus courants. Ce type de liaison entre les acides uroniques et le rhamnose crée des courbures dans la structure. La macromolécule de pectine adopte une forme en zigzag, ce qui lui confère une certaine flexibilité, bénéfique pour les plantes. [46]

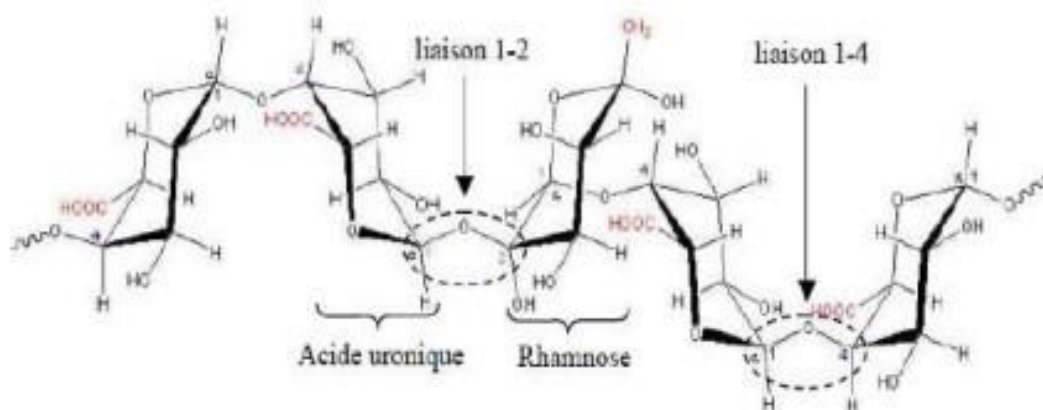


Figure (I.9) : Structure d'une chaîne d'acide poly galacturonique et formation d'un coude par la présence de rhamnose. [46]

I.2.10.6 Protéines

La structure principale des protéines est l'HRGP (protéine glycosylée riche en hydroxyproline), souvent désignée à tort sous le nom d'« extensine » lors de sa découverte. Le réseau formé par les HRGP joue un rôle crucial en fin de croissance en limitant les propriétés plastiques du réseau polysaccharidique, contribuant ainsi à la stabilisation de la structure [46].

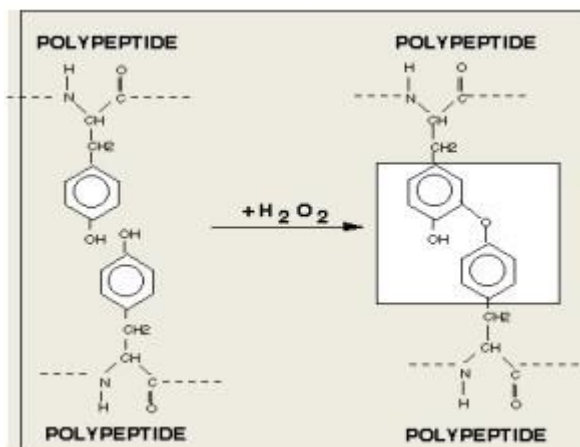


Figure (I.10) : Les chaînes d'HRGP liées entre elles à l'aide de liaisons covalentes entre deux Tyrosines. [66]

I.2.11 Techniques d'obtention des fibres végétales

I.2.15.1 Rouissage biologique

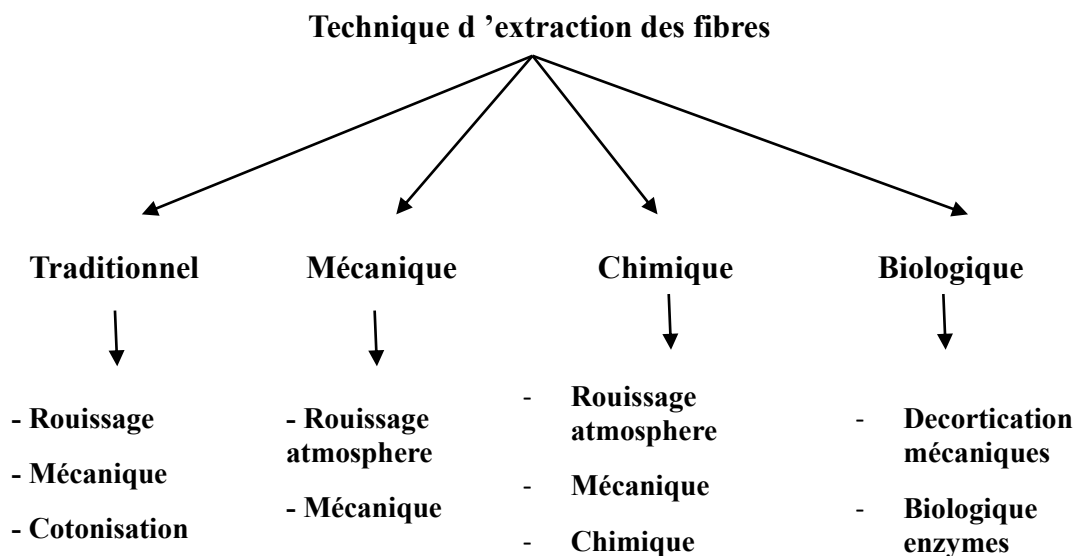
Le rouissage biologique est une méthode d'extraction traditionnelle qui repose sur l'action de bactéries présentes dans l'environnement pour dissoudre les substances extractibles. Des bactéries comme *Bacillus* et *Clostridium* sont utilisées dans le rouissage à l'eau, tandis que certains champignons, tels que *Penicillium* et *Fusarium laterium*, sont employés lors du rouissage à la rosée. Ces microorganismes se sont avérés très efficaces pour éliminer les substances non celluliques des plantes, facilitant ainsi la libération de la fibre. Bien que cette méthode nécessite un temps d'extraction relativement long, le rouissage atmosphérique permet d'obtenir des fibres de bonne qualité. Cependant, il convient de noter que le contrôle de la qualité de la fibre reste difficile. [47]

I.2.11.1 Rouissage chimique

Le rouissage chimique utilise généralement des solutions alcalines ou acides doux pour faciliter l'extraction des fibres. L'ajout d'enzymes permet d'accélérer ce processus de libération des fibres. La soude caustique est l'alcali le plus couramment employé, tandis que des acides doux tels que l'acide sulfurique et l'acide oxalique, souvent associés à un détergent, sont également utilisés pour l'extraction. Il est important de noter que la composition de la solution de traitement influence directement sur la qualité des fibres extraites. Par exemple, le procédé Kraft est utilisé pour délignifier des matières celluliques comme le bois. Ce procédé implique une cuisson chimique de deux heures dans une solution aqueuse de soude caustique (NaOH) et de sulfure de sodium (Na₂S) à une température de 170°C à 175°C. Les anions d'hydroxyde (OH⁻) et de sulfure (S²⁻) agissent en dégradant la lignine, l'hémicellulose et les pectines par dissolution. [48]

I.2.11.2 Rouissage mécanique

Le rouissage mécanique repose sur l'utilisation de machines à décortiquer telles que le vapocraquage, l'ammoniaque et le procédé Tilby. Ce dernier s'avère particulièrement efficace pour l'extraction des fibres de canne à sucre, de maïs et d'autres plantes cellulosiques. L'un des principaux avantages de ce procédé est qu'il permet d'extraire les fibres sans altérer les constituants des plantes.[47]



I.2.12 Techniques de mise en œuvre des matériaux à fibres végétales

Les matériaux à fibres végétales sont utilisés dans de nombreuses applications telles que la construction, la fabrication de meubles, les vêtements et les emballages. Le processus de mise en œuvre de ces matériaux nécessite une connaissance approfondie des propriétés physiques et chimiques des fibres végétales ainsi que de la manière de les combiner avec d'autres matériaux pour développer des produits performants. Voici quelques techniques de mise en œuvre de ces matériaux [48] :

I.2.12.1 Moulage au contact

Il s'agit de la méthode la plus simple, nécessitant un minimum d'équipements. Elle consiste à utiliser des moules en bois verni, en métal, etc., sur lesquels on applique successivement : un agent de démoulage, une couche de surface (facultative), puis plusieurs couches de renforts imprégnées manuellement au rouleau d'une résine qui polymérise à température ambiante.[67]

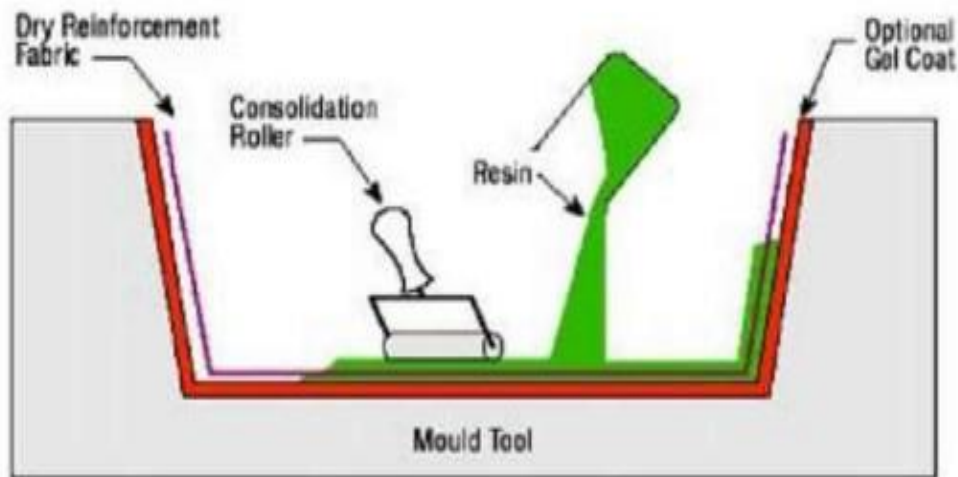


Figure (I.11) : Moulage au contact.

I.2.12.2 Moulage par injection

- Un mélange de fibres végétales et de matériaux polymères est injecté sous haute pression dans des moules, permettant ainsi de former des pièces spécifiques comme des éléments de mobilier ou des pièces automobiles.

- Cette technique est utilisée pour augmenter la densité des fibres végétales et améliorer les propriétés des matériaux finaux. [48]

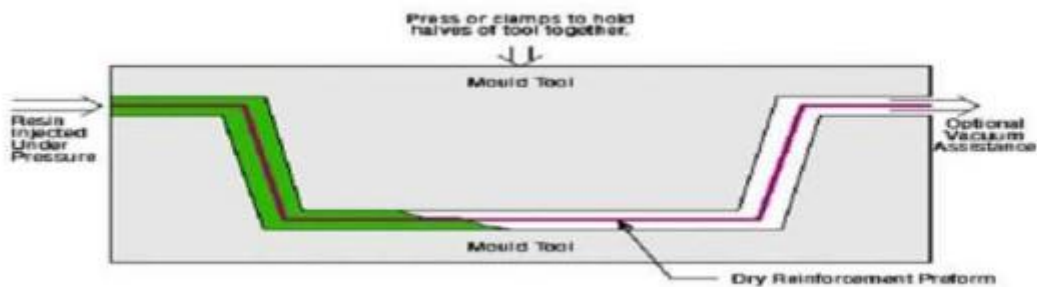


Figure (I.12) : Méthode de projection simultanée.

I.2.12.3 Moulage par compression

Le moulage par compression est l'une des techniques les plus rentables pour fabriquer en grande quantité des pièces de petite ou moyenne taille. Cette méthode consiste à déposer une préforme de compound de moulage (un mélange prédéfini de résine, renfort, catalyseur et additifs) dans un moule chauffé, puis à la comprimer pour lui donner sa forme finale. Les pressions utilisées se situent généralement entre 0,5 et 15 MPa.[12]

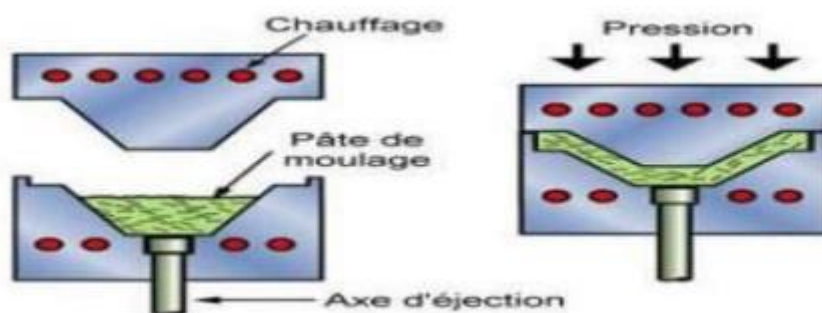


Figure (I.13) : Méthode de moulage par compression.

I.2.12.4 Moulage sous vide

Les renforts fibreux sont placés à sec sur un film démoulant qui épouse la géométrie du moule. Une membrane flexible agit comme contre-moule et maintient l'étanchéité. Le vide appliqué permet à la résine de s'imprégner dans les renforts fibreux et de remplir les cavités. Cette méthode pourrait être couplée à un système de chauffage pour activer la polymérisation de la résine. À température ambiante, la pression responsable de l'écoulement de la résine équivaut à la pression atmosphérique.[12]

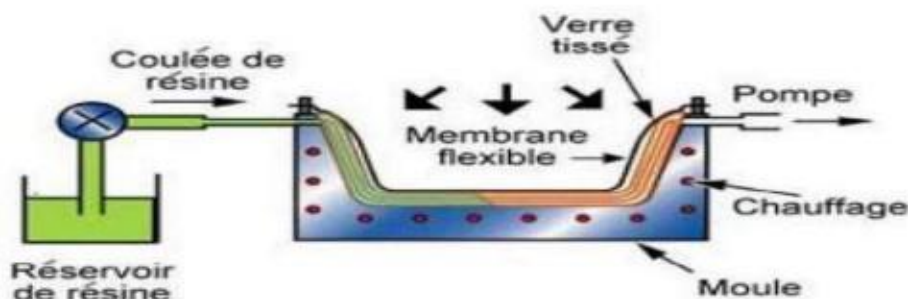


Figure (I.14) : Méthode du moulage sous vide.[68]

I.2.12.5 Moulage par transfert de résine (RTM- Raisin Transfert Mödling)

Le moulage par transfert de résine consiste à imprégner un renfort placé dans un moule rigide et fermé, composé d'un moule et d'un contre-moule. La résine est introduite soit par injection, soit par l'effet du vide. Cette méthode permet d'obtenir des pièces avec un taux de fibres élevé, offrant ainsi des caractéristiques mécaniques exceptionnelles. Ce procédé est idéal pour réaliser des pièces de formes complexes et de grande profondeur.[68]

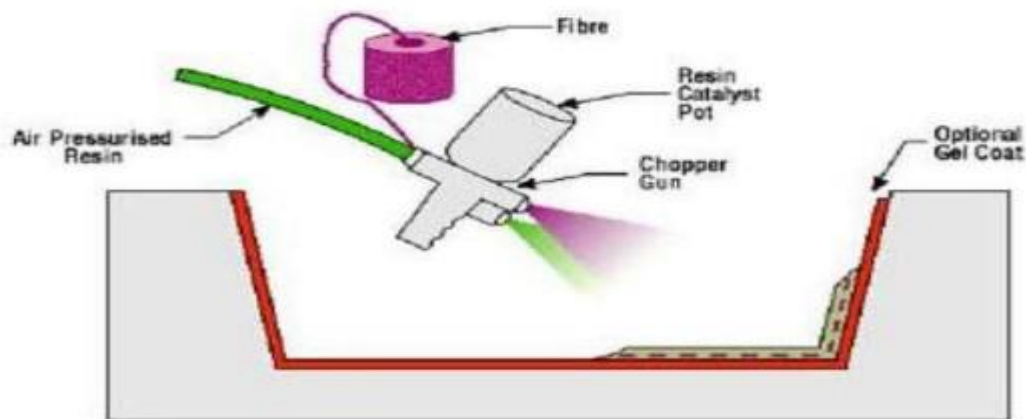


Figure (I.15) : Principe du moulage par injection de résine.[69]

Les matériaux composites se classent en fonction de la nature de leur matrice, qui peut être organique, métallique ou céramique. Leurs propriétés mécaniques dépendent principalement de l'adhérence entre la matrice et les fibres, ainsi que de la maîtrise des propriétés physiques et chimiques des renforts utilisés lors de leur fabrication. Les fibres naturelles offrent plusieurs avantages, tels qu'un coût réduit, une source renouvelable, une biodégradabilité et des propriétés mécaniques spécifiques intéressantes, notamment en termes de résistance et de rigidité. Cependant, comme pour tout produit naturel[40], les propriétés mécaniques et physiques de ces fibres varient significativement. Ces variations sont influencées par leur composition chimique et structurale, ainsi que par le type de fibre. La cellulose, principal composant des fibres végétales, présente également des différences selon la fibre considérée.[68]

I.2.13 Propriétés des matériaux à fibres végétales

I.2.13.1 Propriétés physiques

En règle générale, les fibres végétales se distinguent physiquement par leur longueur, leur diamètre et leur densité. Selon une revue de la littérature sur leurs caractéristiques.[50]

Tableau 3 : Caractéristiques physiques de quelques fibres végétales.[44]

Fibres	Longueur(mm)	Diamètre (μ .m)	Densité (g/cm^3)
Coton	35	19	11.5-1.6
Lin	4-77	5-76	1.54
Sisal	200	0.08-0.30	0.75-1.07
Coco	/	0.11-0.53	0.67-1
Alfa	5-50	5-95	1.51
Jute	9-70	25-200	1.44

La variabilité des paramètres géométriques, tels que la longueur et le diamètre des fibres végétales, s'explique par des facteurs similaires à ceux influençant leur composition chimique. Ces variations sont le résultat de l'effet combiné de multiples éléments intervenant tant au niveau de leur croissance agricole que lors de leur transformation industrielle. Par ailleurs, les dimensions transversales des fibres diffèrent selon leur position dans la tige. [51]

Une autre propriété essentielle des fibres végétales est leur capacité d'absorption d'eau. Ce phénomène peut, à long terme, entraîner des variations de volume des fibres, provoquant ainsi des modifications de l'interface entre les fibres et la matrice. Ces effets sont directement liés à leur aptitude à absorber l'eau. [50]

Le tableau ci-dessous présente les résultats concernant le coefficient d'absorption d'eau des fibres végétales les plus couramment utilisées comme renforts dans les composites.

Tableau 4 : Coefficient d'absorption d'eau de différentes fibres végétales utilisées. [51]

Fibres	Absorption d'eau %
Bagasse	122.5
Coco	93.8
Jute	281
Palmier	129.9
Bambou	51
Sisal	110

I.2.13.2 Propriétés mécaniques

Les propriétés mécaniques des fibres végétales dépendent de leurs caractéristiques intrinsèques, telles que leur composition chimique (cellulose, hémicellulose, lignine, et pectines), la structure de la fibre (section, porosité, angle micro-fibrillaire, facteur de forme, rapport longueur/diamètre, etc.), ainsi que des facteurs anthropiques (type de défibrage, itinéraire technique, etc.) [52]. Elles sont également influencées par des caractéristiques variables et indépendantes, telles que le taux d'humidité, la position des fibres dans la tige, les défauts naturels et les conditions de croissance. En général, bien que des variations inter-espèces existent, le module de Young des fibres végétales est comparable à celui de la fibre de verre, et leurs propriétés spécifiques, rapportées à la densité, sont supérieures à celles de la fibre de verre [50].

Le comportement mécanique en traction des fibres végétales est déterminant pour évaluer leur influence sur les propriétés finales du composite.

Tableau 5 : Propriétés mécaniques de différentes fibres végétales. [51]

Fibres naturelles	Résistance à la traction (MPa)	Allongement à la rupture (%)	Module de Young (GPa)
Jute	200–800	1,16–8	10–55
Banane	529–914	3	27-32
Coco	106-175	14,21-49	4-6
Lin	150-300	1,3-10	24-80
Kenaf	119-295	3,5	2,86
Feuille d'ananas	162-170	2,4	60-82
Sisal	80-840	2-25	9-38
Chanvre	310-900	1,6-6	30-70
	348-938	1,2-8	44-12

I.2.14 Traitements des fibres végétales

Pour stabiliser la fibre végétale, la bibliographie recense trois types de traitements : physique, chimique et thermique.

I.2.14.1 Traitement physique

Les principaux produits utilisés dans ce traitement incluent les huiles, les paraffines et les résines. Selon l'étude de Broker et al, l'utilisation du polyéthylène glycol (PEG) permet de

réduire le retrait des fibres d'un facteur 10, sans altérer leurs propriétés mécaniques. Des échantillons traités avec 15 à 20 % de PEG affichent un retrait définitif de seulement 0,1 % après 56 jours. [53]

I.2.14.2 Traitement chimique

La modification chimique des surfaces des fibres vise à rendre deux matériaux compatibles en introduisant un troisième matériau aux propriétés intermédiaires. Ce couplage permet d'associer des fibres cellulosiques fortement hydrophiles à des polymères hydrophobes [BLE Ce traitement repose principalement sur des modifications de surface des fibres lignocellulosiques, en ciblant la cellulose, composant majoritaire de ces fibres. La structure spatiale de la cellulose influence directement ses propriétés physiques et chimiques : la région amorphe est nettement plus accessible aux réactifs que la région cristalline. [54]

Divers traitements chimiques peuvent être appliqués aux fibres lignocellulosiques, tels que l'oxydation, l'estérification, l'éthérification et la mercerisation, entre autres. Ces traitements visent à améliorer les propriétés adhésives des surfaces des fibres en éliminant les impuretés naturelles et artificielles [39]. La plupart de ces procédés sont précédés d'un prétraitement dans une solution alcaline, permettant de rompre les liaisons hydrogène intra- et intermoléculaires de la cellulose. Ce prétraitement libère les groupements hydroxyles, les rendant ainsi plus réactifs et facilitant la modification chimique ultérieure. [49]

I.2.14.3 Traitement thermique

Le traitement consiste à chauffer les fibres dans une atmosphère inerte jusqu'à une température de 280 °C, en maintenant cette condition pendant une durée suffisante pour modifier leur structure Cette méthode, appelée torréfaction, a été étudiée en détail par Bourgois et ses collaborateurs [54]. Le procédé mis en œuvre implique un traitement thermique du bois dans une atmosphère inerte à des températures inférieures à 280 °C. La durée du traitement est ajustée pour atteindre les propriétés souhaitées, avec l'avantage de minimiser la dégradation des fibres tout en préservant au mieux leurs propriétés mécaniques. [55]

Ont expérimenté un traitement thermique différent en portant les fibres de disse à ébullition dans une cocotte pendant quatre heures, suivi d'un lavage destiné à éliminer les sucres et les composants hydrosolubles présents dans les fibres.

I.2.15 Applications des matériaux bio composites

Les composites renforcés par des fibres naturelles trouvent principalement leur application dans l'industrie automobile, qui a développé une gamme de nouveaux composants à base de ces

fibres. En Europe, l'industrie automobile est le principal secteur utilisateur des composites à fibres végétales. Les bio fibres combinées avec des thermoplastiques ou des résines thermodurcissables sont employées dans divers composants intérieurs et accessoires des véhicules. [12]

L'utilisation de ces composites dans les composants automobiles ne cesse de croître avec l'apparition de nouveaux modèles. Récemment, une avancée notable a été l'extension de l'utilisation des composites à bio fibres également dans les composants extérieurs des automobiles. [12]



Figure (I.16) : Application des matériaux composites à base de fibres naturelles dans le domaine d'automobile.

En ce qui concerne le secteur de la construction, l'utilisation de matériaux à base de végétaux n'est pas une idée nouvelle. Le secteur est l'un des plus grands consommateurs de ressources naturelles et d'énergie, faisant de lui une source majeure de production de gaz à effet de serre. Face à ces enjeux environnementaux, l'une des solutions réside dans la redécouverte et l'optimisation de l'utilisation de matériaux végétaux. [10]

Le choix du matériau de renfort est crucial, car il doit posséder de bonnes propriétés mécaniques, être compatible avec la matrice et rester économiquement viable. Les fibres naturelles, telles que celles provenant du bois ou du chanvre, issues de sources renouvelables, représentent une avenue prometteuse dans la recherche. Par exemple, dans le domaine du génie civil, des bétons à base de bois sont utilisés, ces matériaux étant classés parmi les éco matériaux en raison de leurs avantages environnementaux. La chènevotte, dérivée de la tige de chanvre et connue pour ses propriétés isolantes, est mélangée à du béton pour des applications variées telles que les blocs préfabriqués, l'isolation ou encore la rénovation. Ses performances thermiques et acoustiques ont fait l'objet de plusieurs recherches approfondies. [41]



Figure (I.17) : Application des matériaux composites à base de fibres naturelles dans le secteur de construction.

I.2.16 Les avantages et les inconvénients de matériaux bio composites

I.2.16.1 Les avantages

Les bio-composites offrent de nombreux avantages, ce qui explique leur adoption croissante dans divers secteurs industriels. Voici leurs principaux atouts [14] :

a Durabilité environnementale

- **Matériaux renouvelable** : Les bio-composites utilisent des ressources naturelles telles que les fibres végétales et les polymères biosourcés, réduisant ainsi la dépendance aux ressources pétrolières.
- **Réduction de l’empreinte carbone** : Leur fabrication génère généralement moins de gaz à effet de serre comparée aux matériaux synthétiques.
- **Biodégradabilité** : Certains bio-composites se dégradent naturellement, contribuant à une gestion plus durable des déchets.[14]

b Légèreté et performance mécanique

- Les fibres naturelles utilisées dans les bio composites (lin, chanvre, jute, etc.) offrent un excellent rapport résistance/poids, ce qui les rend compétitifs par rapport aux matériaux conventionnels.
- Leur légèreté contribue à la réduction de la consommation énergétique dans des applications comme l'automobile et l'aéronautique.[15]

c Propriétés thermiques et acoustiques

- Excellentes capacités d'isolation thermique et acoustique, ce qui les rend adaptés à des applications dans la construction et l'aménagement intérieur.

- Résistance modérée aux hautes températures grâce à des matrices spécifiques. [15]

d Facilité de transformation et coût compétitif

- Les bio-composites peuvent être fabriqués à l'aide de procédés industriels existants, limitant les coûts d'investissement en équipement.

- Les fibres naturelles sont souvent moins coûteuses que les fibres synthétiques (ex. : fibre de verre), rendant les bio-composites économiquement avantageux.[16]

e Polyvalence d'utilisation

- Utilisés dans des secteurs variés comme la construction, l'automobile, l'emballage, les biens de consommation, et même le biomédical.

- Leurs propriétés peuvent être ajustées en fonction des combinaisons de matrices et de renforts.[17]

f Conformité aux réglementations environnementales

- Les bio-composites s'intègrent parfaitement dans les stratégies de développement durable et répondent aux exigences croissantes des réglementations en matière de matériaux écologiques. [17]

I.2.16.2 Les inconvénients

Les bio-composites, bien qu'ils offrent de nombreux avantages, présentent également certains inconvénients qui peuvent limiter leur utilisation dans certaines applications. Voici les principaux inconvénients des bio-composites. [17]

a Sensibilité à l'humidité

- Les fibres naturelles utilisées comme renforts dans les bio-composites ont tendance à absorber l'humidité, ce qui peut entraîner :

- Un gonflement et une déformation du matériau.

- Une diminution des propriétés mécaniques, notamment la résistance et la durabilité. [18]

b Propriétés mécaniques limitées

- Les performances mécaniques des bio-composites, telles que la résistance à la traction et à la compression, sont souvent inférieures à celles des composites renforcés par des fibres synthétiques comme la fibre de verre ou de carbone.

- Leur durabilité peut être insuffisante dans des environnements soumis à des contraintes élevées. [19]

c Résistance thermique réduite

- Les matrices et fibres naturelles utilisées dans les bio-composites ont généralement une faible tolérance aux températures élevées, ce qui limite leur utilisation dans des applications nécessitant une forte résistance thermique. [20]

d Durée de vie limitée

La dégradation naturelle des fibres biosourcées peut entraîner une diminution des performances à long terme, en particulier dans des environnements extérieurs ou humides.[21]

e Problèmes d'adhésion entre la matrice et le renfort

Une compatibilité limitée entre les fibres naturelles et certaines matrices peut réduire l'efficacité du transfert de contraintes mécaniques.

Cela nécessite souvent des traitements spécifiques ou des agents de couplage pour améliorer l'adhésion, ce qui peut augmenter les coûts. [22]

f Variabilité des propriétés

Les fibres naturelles présentent une variabilité intrinsèque dans leurs dimensions, leur composition chimique et leurs propriétés mécaniques, ce qui peut entraîner une hétérogénéité dans les performances des bio-composites. [23]

g Processus de fabrication complexe

Comparé aux composites synthétiques, le traitement des fibres naturelles peut être plus complexe, en raison de leur sensibilité à l'humidité, de leur fragilité et de la nécessité de traitements préalables (par exemple, séchage ou modification de surface). [24]

h Biodégradabilité conditionnelle

Si la matrice utilisée n'est pas biodégradable, les bio-composites ne le seront pas complètement, ce qui peut limiter leurs avantages environnementaux [25]

I.3 Conclusion

L'intérêt croissant pour les composites à base de polymères renforcés par des fibres naturelles est dû à leurs excellentes performances, leur biodégradabilité, leur faible coût et leur faible densité. Ces fibres, étant renouvelables, constituent une ressource importante pour de nombreux pays, et ces composites offrent une alternative aux matériaux comme le bois, de plus en plus rare, contribuant ainsi à résoudre des problèmes environnementaux, tels que la réduction des composites synthétiques et des déchets agricoles. Ce chapitre examine diverses études sur les propriétés physiques et mécaniques des composites renforcés par des fibres naturelles, en mettant l'accent sur l'importance de l'interface et l'impact des modifications de surface. Il explore également les différentes combinaisons de renforts en fibres végétales utilisées pour la fabrication de ces matériaux, tout en soulignant l'évolution réussie de leur exploitation. Cependant, des défis demeurent concernant le développement de techniques de fabrication plus efficaces et la création de composites avec des propriétés mécaniques supérieures. Malgré cela, des avancées significatives ont permis l'application de ces matériaux dans divers secteurs, notamment les articles de consommation et l'industrie automobile.

Chapiter II:

Etude expérimentale

II.1 Introduction

Les matériaux composites renforcés par des fibres gagnent en popularité dans de nombreux domaines de l'ingénierie en raison de leurs excellentes propriétés mécaniques et de leur faible densité. Les propriétés de ces matériaux composites dépendent des composants sélectionnés, tels que la matrice et les fibres, et ces dernières sont généralement extraites de sources pétrolières. Bien que ces matériaux présentent des caractéristiques attrayantes, leur utilisation à long terme est limitée en raison de l'absence de méthodes de recyclage et de certains défis environnementaux. Dans ce contexte, il y a une augmentation de la recherche de matériaux alternatifs naturels, plus durables et respectueux de l'environnement, qui peuvent contribuer à réduire les déchets, augmenter l'utilisation de matériaux renouvelables et améliorer le recyclage. Les fibres naturelles comme le coton, le chanvre, le coco, et d'autres, constituent une alternative prometteuse en raison de leurs avantages tels que leur résistance, leur légèreté, leur recyclabilité, et leur faible coût. Parmi ces fibres naturelles, les fibres de luffa se distinguent comme un choix idéal pour renforcer les matériaux composites légers grâce à leur structure poreuse, leur abondance et leur faible coût. De plus, la plante de concombre a démontré son importance dans ce domaine, car ses fibres peuvent être utilisées pour renforcer des matériaux composites en raison de leur force, de leur flexibilité et de leur origine renouvelable. La recherche actuelle se concentre sur l'étude des propriétés de ces fibres en termes de mécanique, de chimie, d'électricité, de thermique, ainsi que d'autres caractéristiques telles que l'absorption de l'eau et la diffraction des rayons X. Ainsi, l'orientation vers l'utilisation des fibres naturelles, y compris celles du luffa et du concombre, est un pas important vers le développement de matériaux plus durables et respectueux de l'environnement dans de nombreuses industries.[56]

II.2 Matériaux de l'étude et matériels utilisés

Les trois principaux constituants utilisés dans notre travail pour l'élaboration des bio composites sont la résine époxyde insaturée comme matrice et les déchets de concombre et la fibre de Luffa comme renforts.

II.2.1 Fibre de Luffa

II.2.1.1 Définition

Luffa est une plante appartenant à la famille des courges (comme le concombre), dont les fruits mûrs sont utilisés comme éponges naturelles pour le nettoyage, tandis que les fruits non mûrs sont consommés comme légumes. Le luffa est répandu de l'Asie du Sud à l'Asie de l'Est et centrale. Le luffa et ses légumes à base de luffa sont courants au Vietnam et en Chine. La figure I.1 montre la plante luffa avec courges et le fruit mûr de la structure fibreuse (faisceaux de fibres). Les fibres de luffa sont connues pour leur solidité, leur résistance et leur rigidité, similaires à celles de nombreux métaux ayant des densités comparables [57].

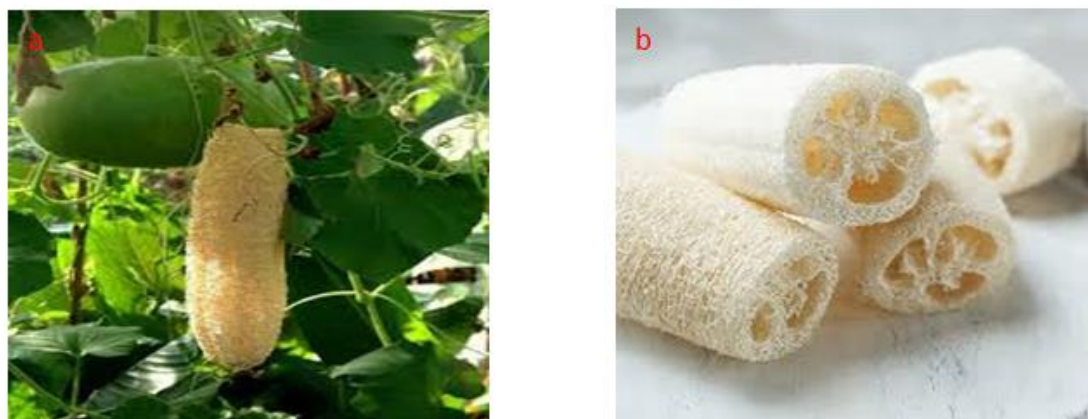


Figure II .1 : a) Plante de luffa et b) Faisceaux de fibres.[65]

La composition chimique du luffa est principalement constituée de lignine, d'hémicellulose et de cellulose, et inclut également certains éléments inorganiques tels que les glycosides, les polypeptides, les acides aminés, et les protéines. Le contenu en hémicellulose varie entre 8% et 22%, celui en lignine entre 10% et 23%, et celui en cellulose entre 55% et 90%. Le tableau I.1 montre les propriétés physiques et chimiques du luffa. Lors des premières étapes de croissance du luffa, sa structure cellulaire se compose de nombreuses fibres individuelles, qui se transforment progressivement en un mat de fibres à mesure de son développement.[57]

Tableau II.1 : Propriétés physico-chimique de la fibre de Luffa.[66]

Propriétés physique				Propriétés chimique			
Densité (g/cm ³)	Diamètre (μm)	Aspectration	Angle Microfibrille (°)	Cellulose (%)	Lignin (%)	Hemicellulose (%)	Cendres (%)
0.56-0.92	270- 20	340-5	12- 2	63.0 2.5	11.69- 1.2	20.88-1.4	0.4-0.10

Comme le montre le tableau II.1, la densité du luffa varie entre 0,56 et 0,92 g/cm³, avec un diamètre moyen d'environ 270 μm et un angle microfibrillaire d'environ 12°. La composition chimique du luffa est composée de 63 % de cellulose, 20,88 % d'hémicellulose, 11,69 % de lignine et 0,4 % de cendres. Le fruit du luffa possède un système vasculaire fibreux avec des tailles variantes entre 15 cm et 1,5 m, et un diamètre moyen compris entre 8 et 10 cm. Il est important de souligner qu'en plus de son utilisation comme légume et éponge de nettoyage, le luffa est également employé dans la médecine traditionnelle chinoise, les filtres militaires et les amortisseurs de chocs.

Les fibres de luffa sont des fibres naturelles qui ont attiré l'attention des chercheurs en raison de leurs propriétés physiques et chimiques. Ces fibres sont abondantes en Chine, au Japon et dans d'autres pays d'Asie, d'Amérique centrale et du Sud.[58]

La structure du système vasculaire fibreux des éponges sèches peut être divisée en deux régions très distinctes : un noyau central avec une structure en nid d'abeille et des parties externes où les fibres sont disposées dans

une matrice multidirectionnelle formant un tapis naturel (figure II.2). Les fruits de *Luffa cylindrique* (l'exemple le plus connu) possèdent un système vasculaire fibreux (éponge de luffa). La structure interne de cette éponge naturelle est caractérisée par une structure micro-cellulaire avec des canaux micro-creux continus (pores larges avec un diamètre compris entre 10 et 20 micromètres), qui forment les faisceaux vasculaires et fournissent un système de pores hiérarchique multimodal (figure II.3).[3]

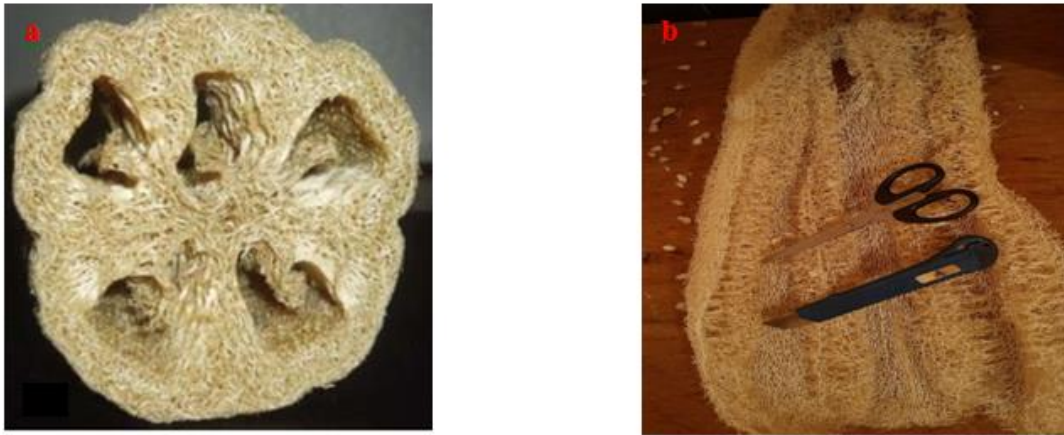


Figure II.2: Structure de la fibre de luffa : a) Coupe transversale et b) Coupe longitudinale.

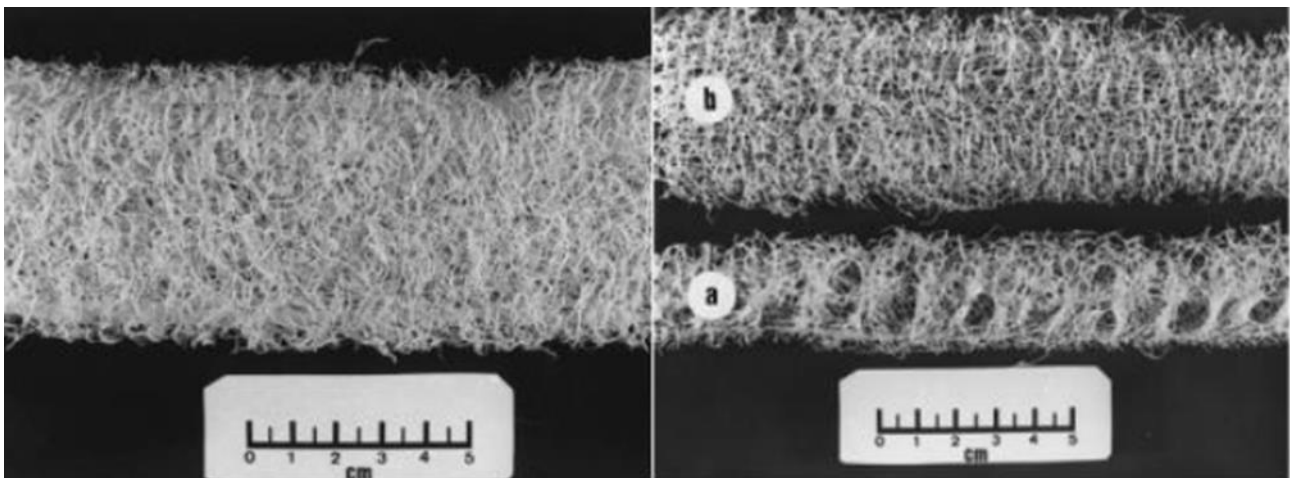


Figure II.3 : Imagerie optique de la structure morphologique de la fibre de Luffa : a) et b) [58].

II.2.2 Déchet de concombre

Le déchet de concombre est utilisé sous forme de bio charbon en exploitant la couche externe protectrice du concombre appelée peau ou épiderme externe.

II.2.2.1 Définition

Le concombre (*Cucumis sativus*), qui appartient à la même famille botanique que le melon et la courge, se divise en deux catégories principales : le « concombre à trancher », destiné à une consommation fraîche, et le « concombre à mariner », utilisé pour la préparation de cornichons. Les concombres à trancher (figure II.4) sont généralement plus grands avec une peau épaisse, tandis que ceux destinés à la marinade sont

plus petits avec une peau plus fine. Très pauvre en calories, le concombre est riche en eau et contient des vitamines et minéraux essentiels. Sa consommation peut offrir de nombreux bienfaits pour la santé, notamment la perte de poids, une hydratation équilibrée, une amélioration de la digestion et une réduction des niveaux de sucre dans le sang. [58]



Figure II.4 : a) Plante de concombre et b) fruit.[58]

II.2.2.2 Structure interne du concombre (*Cucumis sativus*)

Le concombre, comme les autres fruits et légumes, possède une structure interne bien définie (figure II.5) qui peut être décrite comme suit :

➤ **Épiderme externe (Peau)**

La peau est la couche externe protectrice du concombre.

Elle est généralement verte et peut être lisse ou recouverte de petites protubérances (épines).

La peau joue un rôle important dans la protection contre les dommages physiques et les infections.

➤ **Tissu parenchymateux (Pulpe)**

Juste sous la peau se trouve le tissu parenchymateux, qui constitue la majeure partie du concombre.

Il est composé principalement d'eau (environ 95 %), ce qui confère au concombre sa texture croquante et juteuse.

Ce tissu contient également des glucides, des vitamines, des minéraux et des composés phytochimiques comme les flavonoïdes et les saponines.

➤ **Zone des graines**

Au centre du concombre se trouve une cavité contenant les graines.[59]

Les graines sont entourées d'un gel translucide qui agit comme une couche protectrice.

Les graines sont riches en nutriments, notamment en huiles, en fibres et en composés bioactifs tels que les lignanes.[60]

➤ **Faisceaux vasculaires**

Les faisceaux vasculaires traversent toute la longueur du concombre, reliant la peau et la pulpe aux graines.

Ils transportent l'eau, les nutriments et les sucres nécessaires à la croissance du fruit.

➤ **Gel protecteur (autour des graines)**

Ce gel est riche en enzymes et en composés biologiques qui aident à protéger les graines et leur permettent de germer dans des conditions favorables.

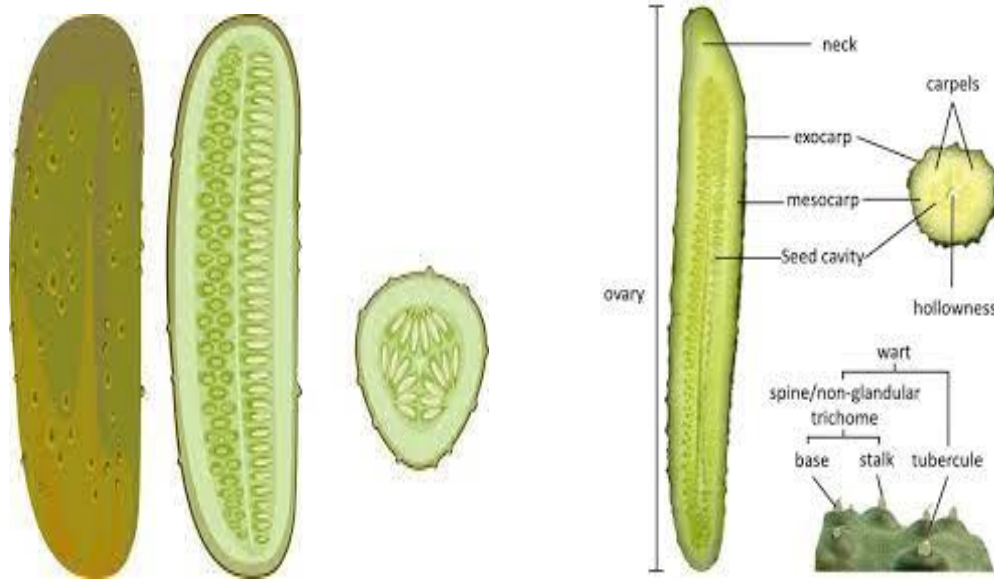


Figure II.5 : Coupe longitudinale et transversale du fruit du concombre [61]

II.2.2.3 Propriétés physiques et mécaniques du concombre

Le concombre (*Cucumis sativus*) se caractérise par des propriétés physiques dominées par une forte teneur en eau et une légèreté (**tableau II.2**), ainsi que par des propriétés mécaniques qui révèlent une souplesse et une capacité d'adaptation (**tableau II.3**). Ces caractéristiques en font un modèle naturel intéressant pour des applications bio-inspirées et des études dans le domaine des matériaux composites ou biodégradables.[61]

Tableau II.2 : Propriétés physiques du concombre [64]

Propriété	Valeur/Caractéristique
Densité	0,96 à 0,98 g/cm ³ (légèrement inférieure à celle de l'eau, ce qui permet au fruit de flotter).
Teneur en eau	90 % à 96 % (très riche en eau).
Couleur	Vert à vert clair avec des stries blanchâtres ou des motifs clairs.
Texture	Lisse ou légèrement rugueuse selon la variété.
Conductivité thermique	Faible, en raison de la forte teneur en eau.
Forme	Cylindrique, allongée, avec des variations de taille (10 à 50 cm selon la variété).
Épaisseur de la peau	Fine mais résistante, recouverte d'une légère couche cireuse.
Poids spécifique	Léger, facilitant sa manipulation.
Capacité de rétention d'eau	Très élevée, contribue à sa texture juteuse.

Tableau II.3 : Propriétés mécaniques du concombre [64]

Propriété	Valeur/Caractéristique
Résistance à la compression	Faible, le fruit se déforme facilement sous une pression excessive.
Élasticité	Modérée, la peau confère une certaine rigidité tandis que la chair est souple.
Résilience	Faible, le concombre ne reprend pas facilement sa forme initiale après déformation.
Adhérence	Moyenne, la surface peut être glissante lorsqu'elle est humide.
Flexibilité de la tige	Élevée, permettant de s'adapter à des charges et de se plier sans se casser.
Rigidité de la tige	Modérée, suffisante pour supporter le poids des fruits.
Résistance à la traction (tige)	Moyenne, adaptée au support de la structure grimpante.
Absorption des chocs (fruit)	Bonne, grâce à la structure interne gorgée d'eau et au parenchyme.

II.2. 3 La résine

La résine utilisée pour cette étude, est une résine époxyde, MEDAPOXY STR, fournie par la société algérienne Granitex, implantée dans la zone industrielle d'Oued Semmar, Alger. La résine est disponible sous forme de kit pré-dosé de deux composants (figure II.6):

- MEDAPOXY STR EA : résine, sa couleur est transparente.
- MEDAPOXY STR EB : durcisseur, sa couleur est brunâtre.

La résine est associée au durcisseur avec des proportions en masse de 60/40, la polymérisation complète de cette résine s'obtient après 14 jours en température ambiante.

Le tableau II.4 présente les caractéristiques techniques de la résine époxyde.

Tableau II.4 : Propriétés de la résine époxyde

Propriété	Valeur
Mass volumétrique	1500 Kg/m ³
Module d'élasticité	3 - 5 MPa
Effort de flexion maximal	100 - 150 MPa
Allongement maximal	2 - 5 %
Résistance au cisaillement	30 - 50 MPa
Température maximale	Résiste à des températures jusqu'à 300 °C
Viscosité	11000 MPa à 25 °C
Densité	1,1



Figure II.6 : Résine utilisée : a) MEDAPOXY STR EA et b) MEDAPOXY STR EB

II.2. 4 Préparation du renfort

II.2. 4.1 Fibre du Luffa

Le renfort du Luffa est obtenu à partir des faisceaux de fibres de Luffa commercialisés au marché local. La fibre est découpée en fibres courtes, puis broyée à fin d'obtenir de petit morceaux de 2 à 3mm de longueur (figure II.7).

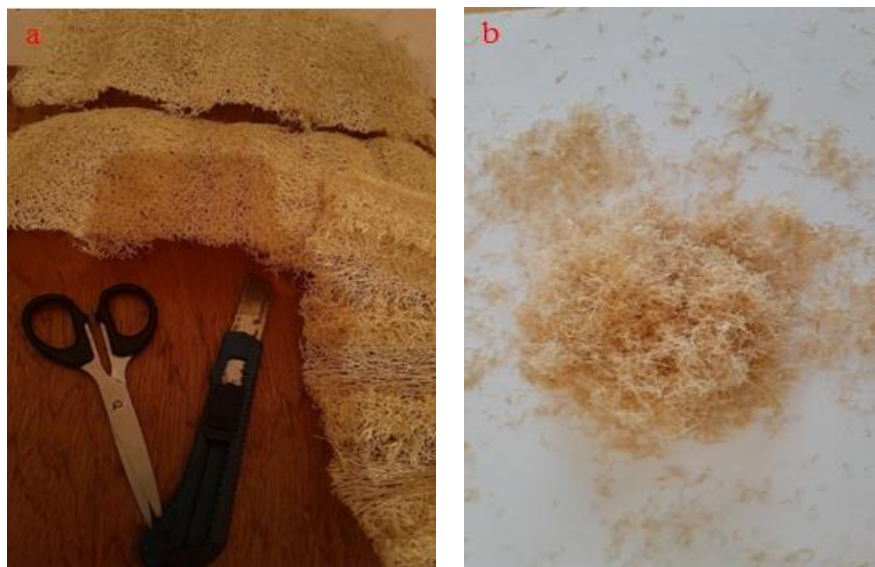


Figure II.7 : a) Faisceau de fibres de luffa et b) Fibres courtes.

II.2. 4.2 Le bio-charbon

Les fibres de concombre ont été obtenues en collectant les restes de cuisine après épluchage de fruits de concombre. Les déchets collectés sont séchées à l'air libre (soleil) pour éliminer complètement l'humidité (figure II.8).



Figure II.8 : a) Déchets collectés et b) Séchage à l'air libre.

Après séchage, les déchets sont calcinés dans un four à une température d'environ 100°C puis refroidis à l'air libre (figure II.9).



Figure II.9 : a) Four de combustion avec déchets et b) Déchets calcinés.

Enfin, les déchets calcinés sont broyés à plusieurs reprises à l'aide d'un Moulinex pour d'obtenir la poudre de bio charbon souhaitée (figure II.10).



Figure II.10 : Broyage de déchets de concombre calcinés.

II.2. 5 Préparation des bio composites

Les bio composites élaborés sont des stratifiés obtenus par imprégnation dans une résine époxyde des fibres courtes de luffa et de biochar. Les taux utilisés sont 10% et 15 % de fibres de luffa (figure II.11) et 1% et 2% de biochar. Les matériaux sont obtenus sous forme de plaques de différentes dimensions (**tableau II.5**), alors que la plaque en résine seule est élaborée par coulée dans un moule en verre de 250x250 mm².



Figure II.11 : Pesage de la quantité de fibres par plaque (g).

Tableau II.5 : Pourcentage des constituants par plaque bio-composite

Plaque	Dimensions mm	Luffa		Biochar		Résine		Poids total (g)
		(g)	(%)	(g)	(%)	(g)	(%)	
Résine époxy	25x25x3	-	-	-	-	187,5	100	187,5
Luffa/Epoxy	30x30x3	27	10	-	-	243	90	270
Luffa/Epoxy	30x30x3	40.5	15	-	-	229,5	85	270
Luffa/Epoxy/Biochar	30x30x3	27	10	2,7	1	240,3	89	39.4
Luffa/Epoxy/Biochar	25x25x3	18.75	10	3,75	2	165	88	187.5
Luffa/Epoxy/Biochar	15x25x3	16.87	15	1,12	1	94,5	84	112,5
Luffa/Epoxy/Biochar	15x27x3	18.22	15	2,43	2	100,84	83	121.5

II.2. 5.1 Préparation de la résine

La quantité de résine nécessaire pour une plaque composite est obtenue en calculant la fraction volumique par rapport au taux de fibres utilisé. La résine est associée au durcisseur avec des proportions en masse de 60/40, la polymérisation complète de cette résine s'obtient après 14 jours en température ambiante.

Les deux composants (résine + durcisseur) sont donc bien mélangés avec une spatule pour obtenir une bonne homogénéité (figure II.12) à une température stable entre 15 et 25 °C.

Pour le cas des plaques renforcées avec du bio charbon, le pourcentage du biochar nécessaire (1% ou 2%) est ajouté délicatement au mélange de résine, à fin d'avoir aussi un mélange homogène (figure II.13).



Figure II.12 : Préparation du mélange (résine + durcisseur).

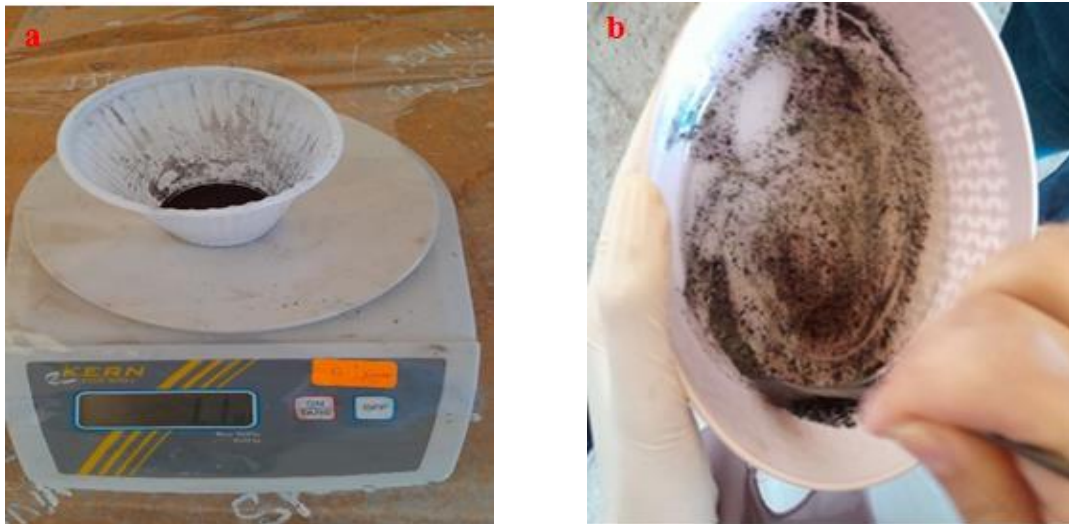


Figure II.13 : Préparation du mélange (résine + durcisseur+ biochar).

II.2. 5.2 Préparation des plaques bio composites

Une fois le processus de préparation des fibres sélectionnées pour cette étude est terminé, nous procédons à la préparation du matériau composite en utilisant des fibres de luffa et du biochar. Cette méthode est limitée par la viscosité de la résine et le début du processus de durcissement (temps de solidification), ainsi que par la forme et la perméabilité du renfort.

Les étapes de préparation d'une plaque bio composite (figure II.14) consiste à déposer un film en plastique transparent (cellophane) sur un moule préparé préalablement, suivi par l'étalement de la résine sur toute la surface du moule par un pinceau, ensuite, le dépôt de fibres aléatoirement sur toute la surface suivi de résine, l'opération de dépôt des fibres et leurs étalement de résine est répétée pour toute la quantité de fibres utilisée (taux de fibres constituant la plaque) et enfin un tissu d'arrachage suivi d'un film en plastique sont déposés. Le film en plastique utilisé est imperméable et n'adhère pas à la résine, et peut être considéré comme un agent de démoulage.

Une fois le processus de dépôt de fibres et leurs étalements de résine sont terminés, une plaque en verre est placée au-dessus pour couvrir le moule et obtenir un bon état de surface. La plaque est démoulée après 6 heures et laissée à température ambiante pendant 14 jours pour assurer la polymérisation complète (figure II.15).



Figure II.14 : Elaboration des plaques composites luffa/époxy/biochar: a) étalage préalable du moule par le mélange résine/biochar, b) dépôt de fibres, c) re-étalage du mélange et d) dépôt de fibres.

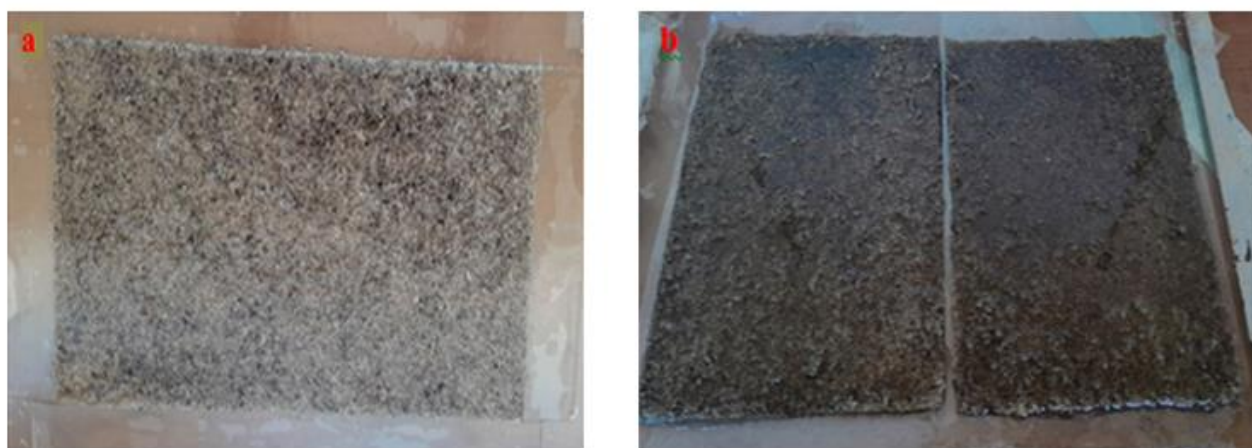


Figure II.15 : Plaques composites obtenues : a) 10% de luffa et 1% biochar et b) 15% de luffa et 1% et 2% biochar.

II.2. 5.3 Préparation de la plaque en résine

La plaque en résine seule est élaborée par coulée du mélange dans un moule en verre de 250x250 mm² préparé préalablement (Figure II.16)



Figure II.16 : Elaboration de la plaque en résine : **a)** coulée de résine dans le moule
Et **b)** plaque obtenue.

II.2. 6 Découpage des éprouvettes

Les échantillons sont découpés à partir des plaques bio-composites et de résine, selon la norme ASTM D 5083, afin de réaliser des essais statiques de traction. Pour faciliter la découpe, une tronçonneuse à disque en diamant de diamètre 200 mm (figure II.17), et une vitesse de coupe de 2500 tr/min avec lubrification est utilisée. Après la découpe les éprouvettes obtenues ont les dimensions de 250 x 50 mm et une épaisseur de 3 mm (figure II.18).

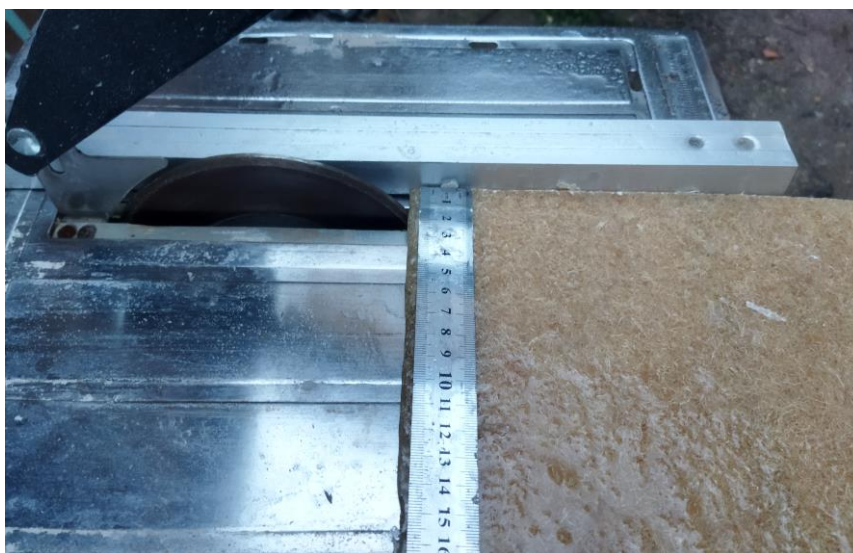


Figure II.17 : Tronçonneuse à disque diamanté utilisée pour le découpage des plaques bio composites.



Figure II.18 : Eprouvtes de traction: a) Résine, b) 10% luffa, 15% luffa et 15% luffa et 1% biochar.

II.2. 7 Séchage des éprouvettes

Après la découpe, les éprouvettes sont séchées à une température de 70°C dans une étuve pendant une durée de 4 heures pour assurer une polymérisation complète (figure II.19).



Figure II.19: a) Etuve et b) Etuve avec éprouvettes

II.2. 8 Description de la machine de traction

Avant les tests, les éprouvettes ont été regroupées selon le taux de fibres et de biochar en sept séries (figure II.20). Chaque série contient trois éprouvettes nécessaires pour le test de traction selon les recommandations de norme ASTM D 5083.

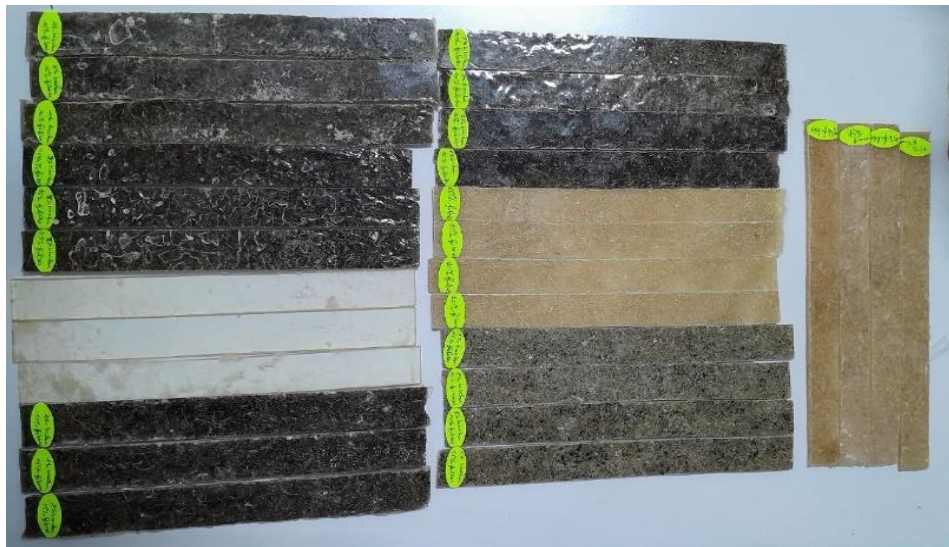


Figure II.20 : Séries des éprouvettes utilisées en traction.

Les essais de traction ont été réalisés au niveau de l'école polytechnique – Constantine, sur une machine d'essai universelle de type Lloyd Instruments/Ametek EZ20 commandée par ordinateur (figure II.21).

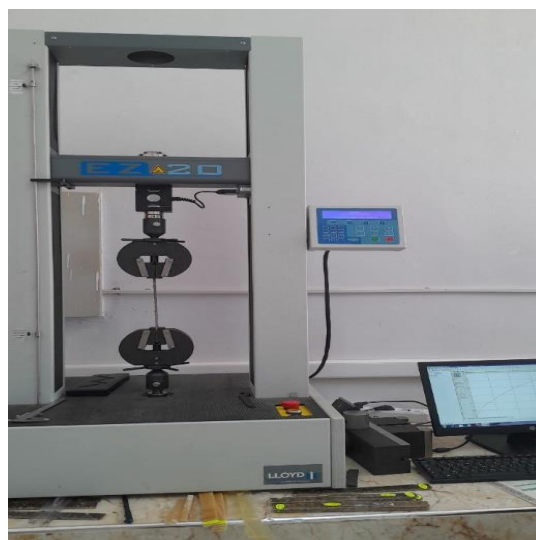


Figure II.21 : Machine de traction utilisée.

Cette machine est équipée d'une cellule de charge de 20 kN (4496 lbf) 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.

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.22). 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 :

$$\sigma = \frac{F}{S} = \frac{F}{a*b} \quad (\text{II.1})$$

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

Où :

F : la force (N)

S : la section de l'éprouvette (mm²)

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 (%).

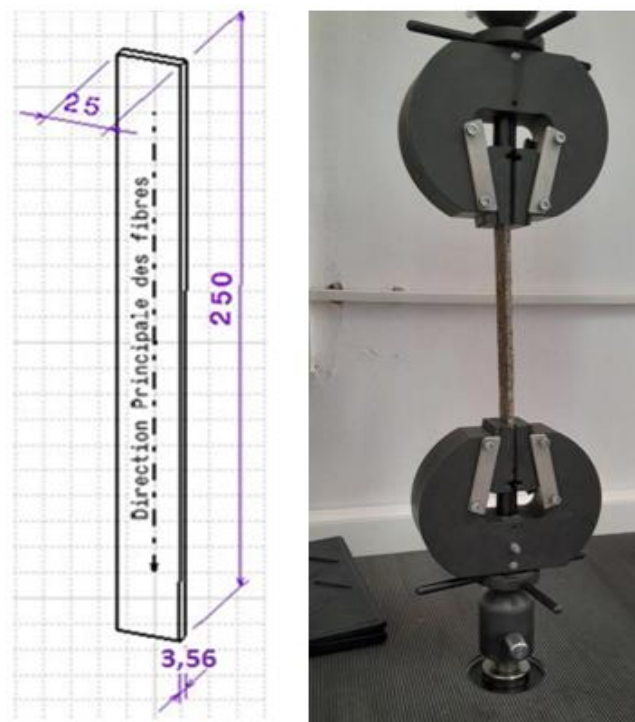


Figure II.22: Essai de traction sur les bio composites

II.9. 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 Luffa/Epoxy et Luffa/Biochar/Epoxy ont été définis. Une description des techniques expérimentales, statiques, et les normes des essais utilisés ont été exposées.

Chapitre III:

Résultats et discussion

III.1. Introduction :

L'amélioration des propriétés mécaniques des matériaux composites à base de polymères et renforcés par des fibres naturelles constitue un enjeu majeur dans le développement de solutions durables et performantes. Ce chapitre s'intéresse à l'étude expérimentale des bio-composites constitués de résine époxy, de fibres de luffa et de biochar. L'objectif est d'analyser l'effet de la variation des pourcentages de fibres et de biochar sur le comportement mécanique des composites, notamment en traction. En comparant les différentes courbes contrainte-déformation obtenues pour chaque formulation, nous cherchons à déterminer la combinaison optimale offrant à la fois une bonne résistance et une déformation satisfaisante, tout en identifiant les éventuels effets négatifs liés à une surcharge en charges renforçantes.

III.2. Résultats et discussions

III.2.1. Essais de traction sur les bio-composites et la résine époxyde

Les propriétés mécaniques (contrainte et déformation à la rupture) des bio-composites et de la résine seule sont déterminées selon la norme ASTM 5083 en utilisant une longueur de mesure (GL) de 150 mm et une vitesse de déplacement de 2 mm/min. Les tests ont été conduits sur une machine de traction universelle de type Lloyd Instruments/Ametek EZ20, d'une capacité de 20 KN.

Pour optimiser les propriétés mécaniques des bio-composites, les expériences sont menées sur trois échantillons de même type.



Figure III.1: Montage des éprouvettes sur la machine de traction

III.2.1.1 Essais de traction sur la résine époxyde

Les éprouvettes de la résine époxyde ont été testés jusqu'à la rupture en traction statique. 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 (figure III-2). On constate une variation dans les valeurs des propriétés mécaniques, force, déplacement, contrainte à la rupture et déformation. Les résultats obtenus sont récapitulés dans le tableau III.1.

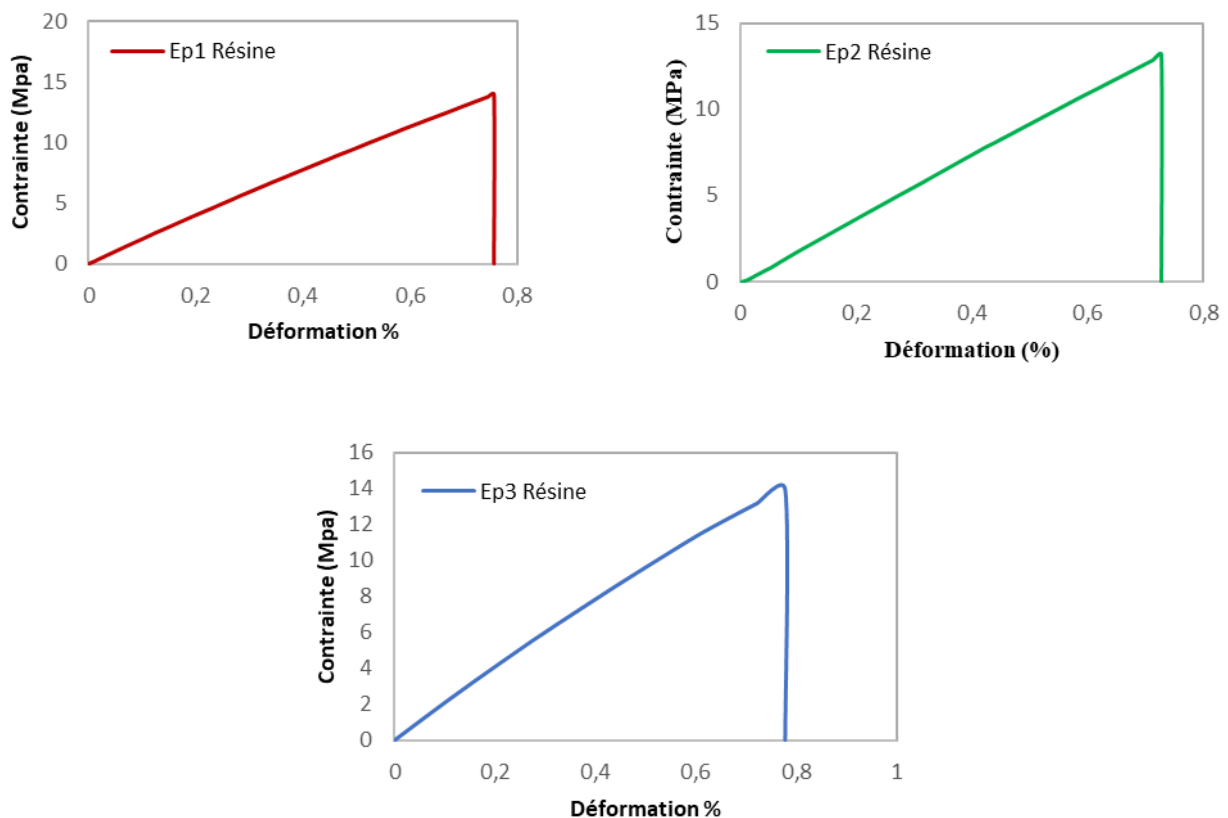


Figure III.2: Courbes contrainte-déformation de la résine.

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

	Force (N)	Déplacement (mm)	Contrainte (MPa)	Déformation (%)
Eprouvette 1	1046.72	1.13	13.95	0.75
Eprouvette 2	988.747	1.08	13.18	0.72
Eprouvette 3	1042.3	1.16	13.89	0.77

III.2.1.2 Essais de traction sur les bio-composites

Les essais de traction sur les matériaux composites contenant différent taux de fibres sans ou avec du biochar ont été aussi conduits dans les même conditions que celles effectués sur les éprouvettes de résine. Pour ce faire, trois éprouvettes parallélépipédiques de 250 mm de longueur, 25 mm de largeur ont été testées, selon la norme ASTM 5083.

- **Bio composite contenant 10% de fibres**

La figure III.3 représente les courbes contrainte/déformation du bio-composite luffa/époxy contenant 10% fibres et testés en traction statique. Les courbes montrent que le comportement du matériau possède deux phases, une première phase élastique caractérisée par une allure quasi linéaire et une phase plastique où la déformation augmente rapidement jusqu'à la rupture brutale des éprouvettes.

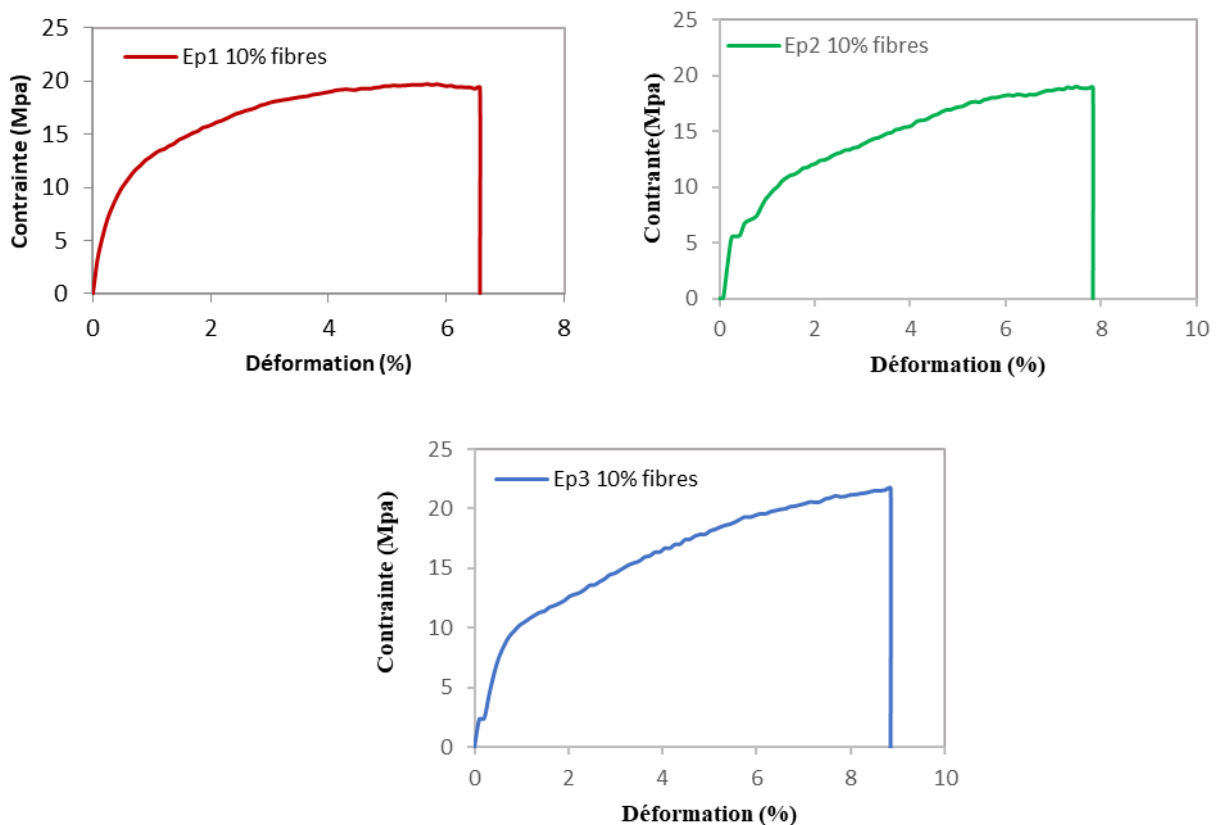


Figure III.3: Courbes contrainte-déformation luffa/époxy avec 10% de fibres.

Le tableau III.2 résume les valeurs maximales des propriétés des éprouvettes bio-composites testées. Bien que ces échantillons soient coupés d'une même plaque, les résultats obtenus se distinguent par des dispersions entre les différents échantillons testés. La dispersion observée est

principalement causée par les dimensions des échantillons, mais elle peut être également liée à la répartition des fibres et l'apparition des cavités dans la matrice (bulles d'air) lors de l'élaboration.

Tableau III.2 : Propriétés mécaniques en traction des éprouvettes luffa/époxy avec 10% de fibres.

	Force (N)	Déplacement (mm)	Contrainte (MPa)	Déformation (%)
Eprouvette 1	1861.55	9.85	19.39	6.56
Eprouvette 2	1815.7	11.762	18.91	7.84
Eprouvette 3	2083.4	13.27	21.70	8.84

- **Bio composite contenant 15% de fibres**

Les courbes contrainte/déformation du bio-composite luffa/époxy contenant 15% fibres testés en traction statique sont représentés dans la figure III.3. L'allure des courbes est presque la même que celle du composite contenant 10% de fibres mais avec une contrainte légèrement supérieure qui atteint la valeur de 24.27 MPa.

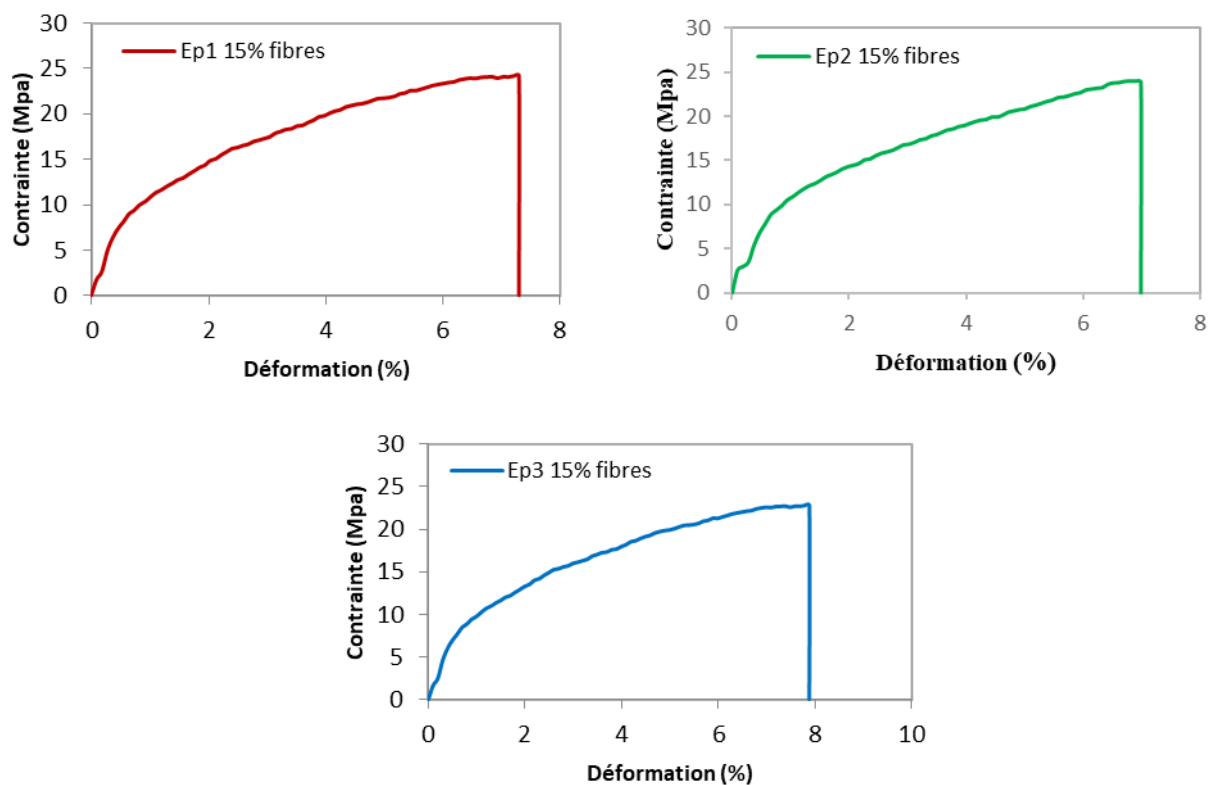


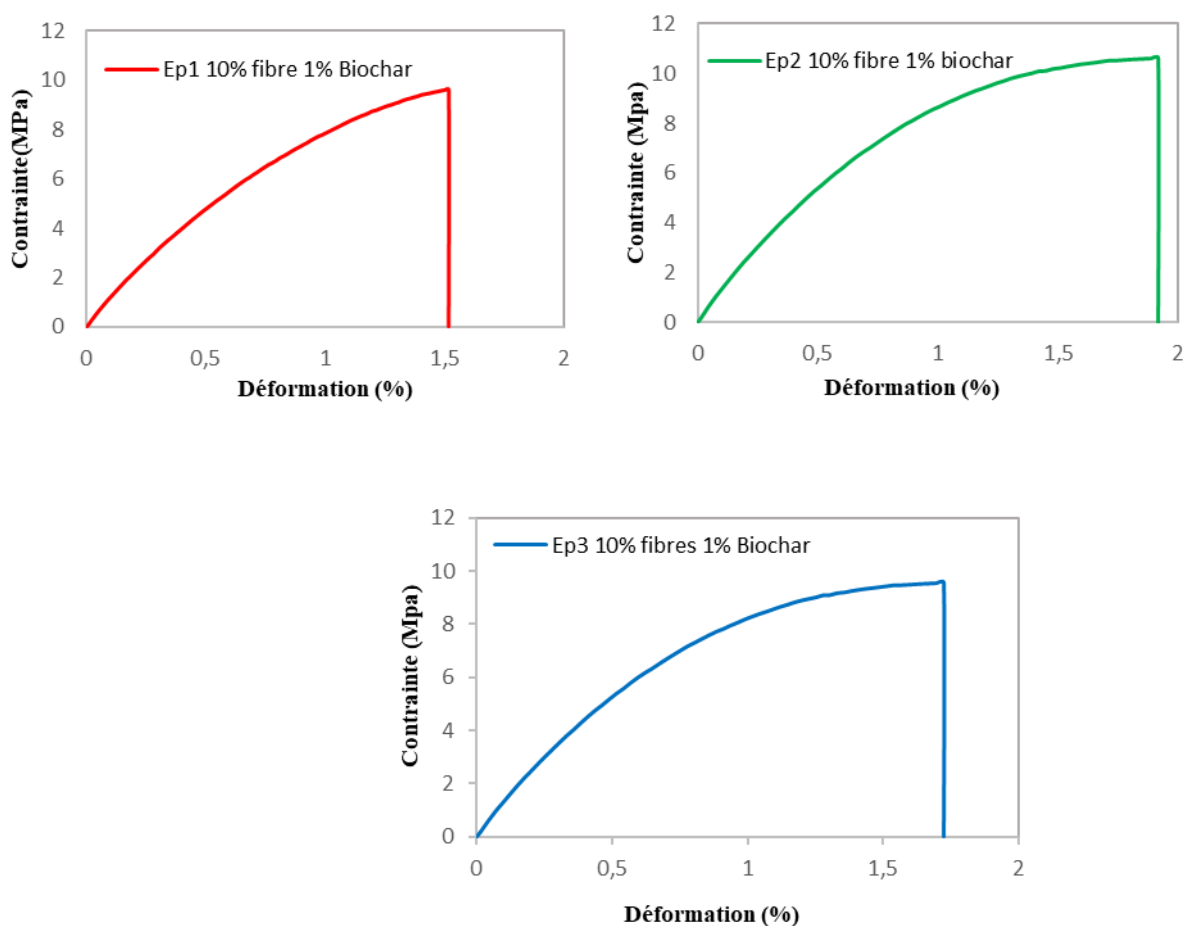
Figure III.4: Courbes contrainte-déformation luffa/époxy avec 15% de fibres.

Tableau III.3 : Propriétés mécaniques en traction des éprouvettes luffa/époxy avec 15% de fibres.

	Force (N)	Déplacement (mm)	Contrainte (MPa)	Déformation (%)
Eprouvette 1	2232.86	10.95	24.27	7.3
Eprouvette 2	2188	10.46	23.78	6.97
Eprouvette 3	2101.52	11.83	22.84	7.89

- **Bio composite contenant 10% de fibres et 1% de biochar**

La figure III.5 représente les courbes contrainte/déformation du Bio composite contenant 10% fibres et 1% de biochar testée en traction statique. L'allure générale des courbes montre une croissance quasi linéaire jusqu'à la rupture brutale des éprouvettes.

**Figure III.5**: Courbes contrainte-déformation luffa/biochar/époxy avec 10% de fibres et 1% biochar.

Les valeurs maximales des propriétés des éprouvettes bio-composite luffa/biochar/époxy testées sont résumées dans le tableau III.4. 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 luffa/époxy avec 10% de fibres et 1% biochar.

	Force (N)	Déplacement (mm)	Contrainte (MPa)	Déformation (%)
Eprouvette 1	996.63	2.27	9.61	1.51
Eprouvette 2	1102.8	2.87	10.60	1.91
Eprouvette 3	992.52	2.58	9.54	1.72

- **Bio composite contenant 10% de fibres et 2% de biochar**

Le comportement des courbes contrainte/déformation du Bio composite contenant 10% de fibres et 2% de biochar est représenté sur la figure III.6.

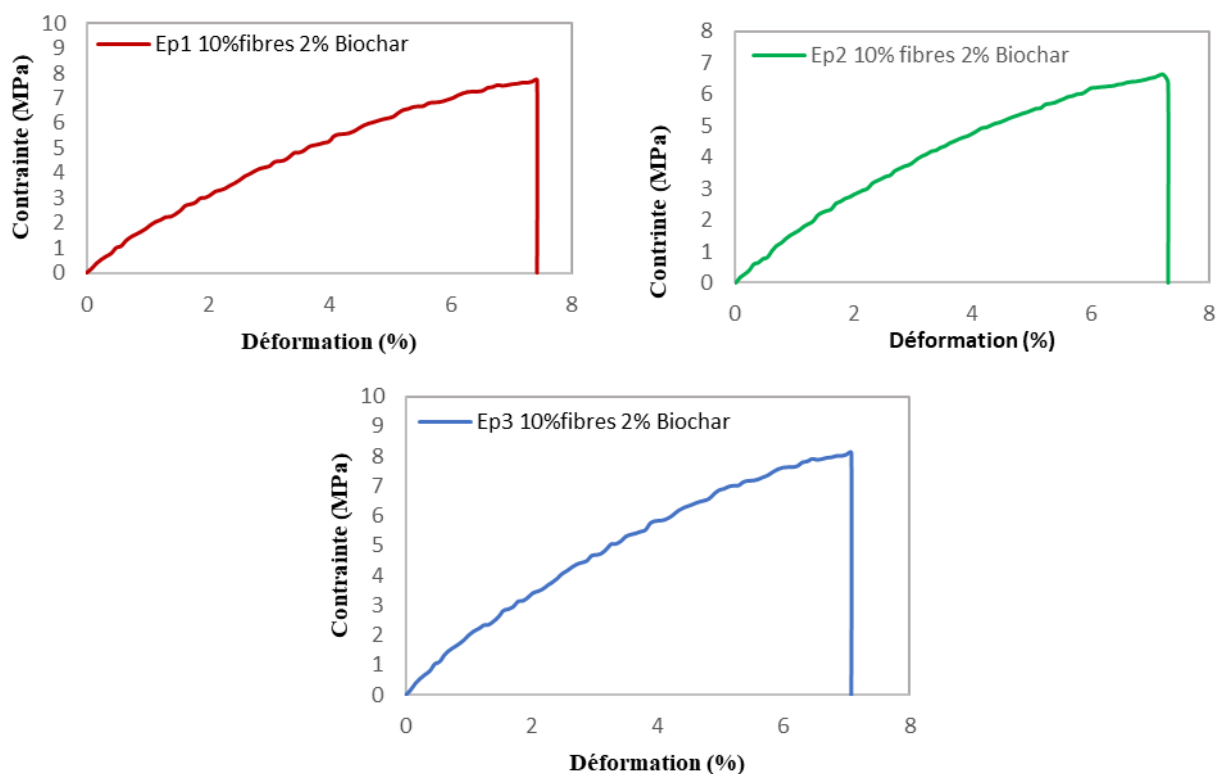


Figure III.6 : Courbes contrainte-déformation luffa/biochar/époxy avec 10% de fibres et 2% biochar.

Les courbes montrent 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

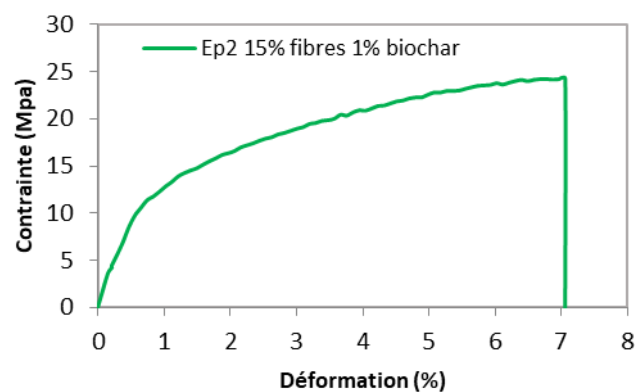
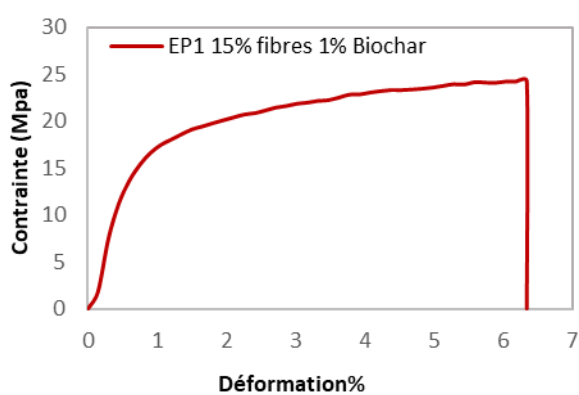
contrainte. Où l'allure des courbes est presque la même que celle du composite contenant 10% de fibres et 1% de biochar mais avec une contrainte légèrement inférieure qui varie de 7.72 MPa à 8.13 MPa et une déformation supérieure de 7.07% à 7.42%.

Tableau III.5 : Propriétés mécaniques en traction des éprouvettes luffa/époxy avec 10% de fibres et 2% biochar.

	Force (N)	Déplacement (mm)	Contrainte (MPa)	Déformation (%)
Eprouvette 1	1004.35	11.13	7.72	7.42
Eprouvette 2	823.54	10.97	6.33	7.31
Eprouvette 3	1057.22	10.60	8.13	7.07

- **Bio composite contenant 15% de fibres et 1% de biochar**

La figure III.6 représente l'évolution de la contrainte en fonction de la déformation du Bio composite contenant 10% de fibres et 2% de biochar. Le comportement est presque similaire que celui du composite sans biochar et contenant 10% de fibres mais avec une contrainte supérieure allant jusqu'à 24 MPa.



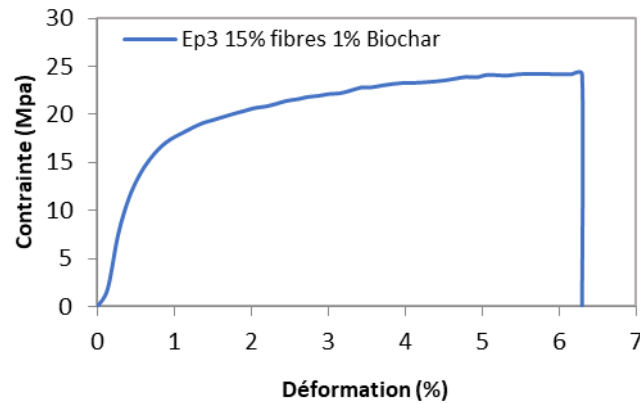


Figure III.7 : Courbes contrainte-déformation luffa/biochar/époxy avec 15% de fibres et 1% biochar.

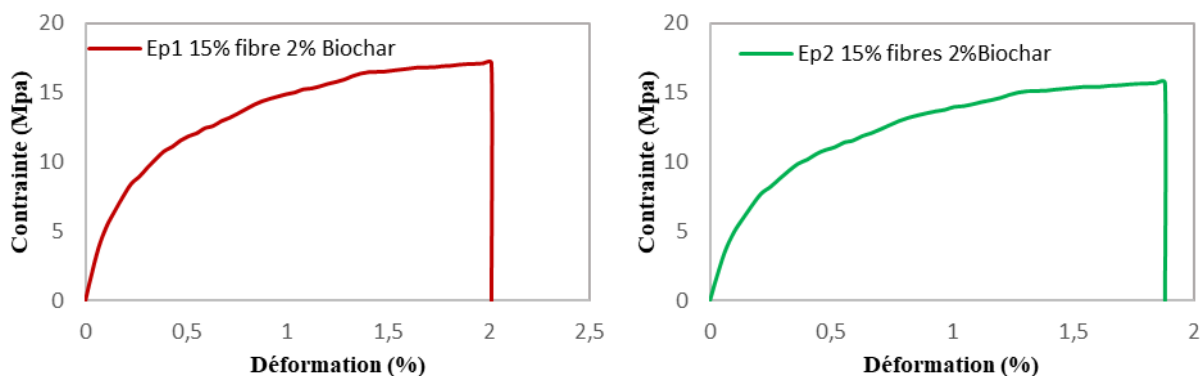
Tableau III.6 : Propriétés mécaniques en traction des éprouvettes luffa/époxy avec 15% de fibres et 1% biochar.

	Force (N)	Déplacement (mm)	Contrainte (MPA)	Déformation (%)
Eprouvette 1	2520.2	9.50	24.23	6.33
Eprouvette 2	2527.47	10.57	24.30	7.04
Eprouvette 3	2515.2	9.46	24.18	6.30

- **Bio composite contenant 15% fibres et 2% de biochar**

Les éprouvettes du Bio composite luffa/biochar/époxy contenant 15% de fibres de luffa et 2% de biochar présentent un comportement similaire à celui du bio-composite contenant 15% fibres et 1% de biochar (figure III.8), avec des valeurs de la contrainte à la rupture et de la déformation inférieures et varient respectivement de 15.72MPa à 17.09 MPa et de 1.88 % à 2.14 %.

Les valeurs des propriétés mécaniques obtenues des trois éprouvettes sont illustrées sur le tableau 7.



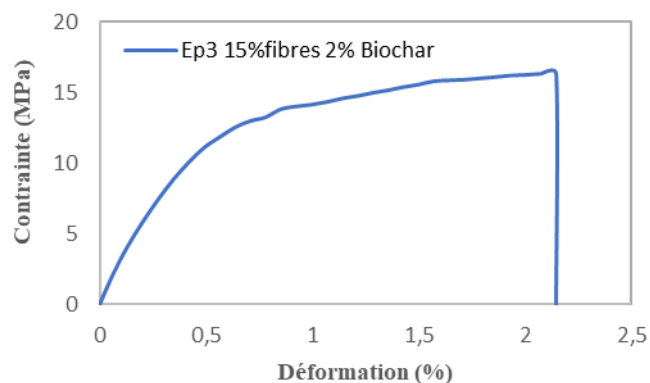


Figure III.8 : Courbes contrainte-déformation luffa/biochar/époxy avec 15% de fibres et 2% biochar.

Tableau III.7 : Propriétés mécaniques en traction des éprouvettes luffa/époxy avec 15% de fibres et 2% biochar.

	Force (N)	Déplacement (mm)	Contrainte (MPa)	Déformation (%)
Eprouvette 1	2666.5	3.02	17.09	2.01
Eprouvette 2	2453.18	2.82	15.72	1.88
Eprouvette 3	2551.1	3.21	16.35	2.14

III.3. Conclusion

L'étude expérimentale en traction statique de la résine et des différents bio-composites élaborés permet de déterminer les points suivants :

- A partir des essais de traction menés sur les éprouvettes en résine, il a été constaté que cette dernière présente un comportement linéaire jusqu'à la rupture.
- Les résultats obtenus à partir des essais de traction réalisés sur des bio-composites luffa/époxy et luffa/biochar/époxy montrent des variations dans les valeurs en fonction du taux de fibres et du biochar utilisés.
- Les essais réalisés sur des bio-composites montrent que l'ajout de biochar aux composite luffa/époxy affecte les propriétés mécaniques du composite en diminuant la contrainte à la rupture et la déformation.

Conclusion Générale

Conclusion générale

L'essor des fibres naturelles dans des secteurs variés tels que le BTP et la médecine met en lumière l'importance des composites bio-sourcés, offrant une solution innovante aux défis économiques et environnementaux contemporains.

Les composites renforcés aux fibres végétales suscitent un intérêt croissant dans la communauté scientifique internationale, grâce à leurs atouts distinctifs : légèreté, faible coût et éco compatibilité.

Le travail présenté dans ce mémoire fait l'objet de l'étude du comportement mécanique d'un bio-composite renforcé par des déchets d'aliments pyrolysés. Les bio-composites élaborés par différents taux de fibres de luffa et de bio-charbon sont testés sous chargement statique en traction et les principaux résultats dégagés sont:

- L'étude bibliographique sur les composites à fibres naturelles, a permis d'appréhender les fondements théoriques ainsi que les applications pratiques.
- La préparation des échantillons de test a permis d'appréhender la technique d'élaboration par la technique d'imprégnation des fibres de luffa et du biochar dans la résine époxyde, ainsi que l'application de la norme utilisée pour la caractérisation en traction statique.
- Les éprouvettes en résine présentent un comportement linéaire jusqu'à la rupture.
- Les échantillons renforcés par des fibres de luffa ont montré une amélioration notable de la résistance à la traction par rapport à la résine pure, avec une augmentation atteignant 45% de la contrainte à la rupture.
- L'ajout de biochar aux composite luffa/époxy affecte les propriétés mécaniques du composite en diminuant la contrainte à la rupture et la déformation.

Les références

- [1]. Segovia Abanto, F., *Développement d'un matériau composite à base de bois laminé avec alliage d'aluminium*. 2018.
- [2]. Ishak, A., *Nouvelles voies de fonctionnalisation de fibres naturelles*. 2023.
- [3]. Zhong, Z., et al., *A machine learning strategy for enhancing the strength and toughness in metal matrix composites*. International Journal of Mechanical Sciences, 2024. **281**: p. 109550.
- [4]. Phiri, R., et al., *Advances in lightweight composite structures and manufacturing technologies: A comprehensive review*. Heliyon, 2024.
- [5]. Farhan, K.Z., M.A.M. Johari, and R. Demirboğa, *Impact of fiber reinforcements on properties of geopolymer composites: A review*. Journal of Building Engineering, 2021. **44**: p. 102628.
- [6]. Kangishwar, S., et al., *A comprehensive review on polymer matrix composites: material selection, fabrication, and application*. Polymer Bulletin, 2023. **80**(1): p. 47-87.
- [7]. Shelly, D., S.-Y. Lee, and S.-J. Park, *Compatibilization of ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE) fibers and their composites for superior mechanical performance: A concise review*. Composites Part B: Engineering, 2024: p. 111294.
- [8]. Wu, J., et al., *Effect of the addition of thermoplastic resin and composite on mechanical and thermal properties of epoxy resin*. Polymers, 2022. **14**(6): p. 1087.
- [9]. Shrivastava, S., et al., *Ceramic Matrix Composites: Classifications, Manufacturing, Properties, and Applications*. Ceramics, 2024. **7**(2): p. 652-679.
- [10]. Potluri, R., *Natural fiber-based hybrid bio-composites: processing, characterization, and applications*, in *Green composites: processing, characterisation and applications for textiles*. 2018, Springer. p. 1-46.
- [11]. Dave, P.N. and P.M. Macwan, *Biocomposites with natural fibers*, in *Advances in Biocomposites and their Applications*. 2024, Elsevier. p. 81-120.
- [12]. Kamarudin, S.H., et al., *A review on natural fiber reinforced polymer composites (NFRPC) for sustainable industrial applications*. Polymers, 2022. **14**(17): p. 3698.
- [13]. Alhijazi, M., et al., *Recent developments in luffa natural fiber composites*. Sustainability, 2020. **12**(18): p. 7683.
- [14]. Rizvi, S.M.H., *Development of Sustainable Bio-Based Polymers as Alternatives to Petrochemical Plastics*. Valley International Journal Digital Library, 2024: p. 107-124.
- [15]. Khan, F., et al., *Advances of Natural Fibers Composites in Diverse Engineering Applications—A Review*. Applications in Engineering Science, 2024: p. 100184.
- [16]. Laasri, L., *Natural fiber composite features, applications, and markets*, in *Multiscale Textile Preforms and Structures for Natural Fiber Composites*. 2023, Elsevier. p. 31-61.
- [17]. Islam, M.S., et al., *Composite materials: concept, recent advancements, and applications*, in *Renewable Polymers and Polymer-Metal Oxide Composites*. 2022, Elsevier. p. 1-43.

-
- [18]. Bachchan, A.A., P.P. Das, and V. Chaudhary, *Effect of moisture absorption on the properties of natural fiber reinforced polymer composites: A review*. Materials Today: Proceedings, 2022. **49**: p. 3403-3408.
- [19]. Ramamoorthy, S.K., et al., *Mechanical performance of biofibers and their corresponding composites*, in *Mechanical and physical testing of biocomposites, fibre-reinforced composites and hybrid composites*. 2019, Elsevier. p. 259-292.
- [20]. Neto, J.S., et al., *A review on the thermal characterisation of natural and hybrid fiber composites*. Polymers, 2021. **13**(24): p. 4425.
- [21]. Chang, B.P., A.K. Mohanty, and M. Misra, *Studies on durability of sustainable biobased composites: a review*. RSC advances, 2020. **10**(31): p. 17955-17999.
- [22]. Nechifor, M., et al., *Maleated coupling agents for the surface treatment of natural fibers*. Surface treatment methods of natural fibres and their effects on biocomposites, 2022: p. 95-123.
- [23]. Khan, T., et al., *Prediction of the tensile properties of biocomposites: a review of micro-mechanical models*. Biomass Conversion and Biorefinery, 2024: p. 1-19.
- [24]. Sinha, S. and G. Devnani, *Natural fiber composites: processing, characterization, applications, and advancements*. 2022: CRC Press.
- [25]. Lazăr, S., et al., *Eco-Design of Polymer Matrix Composite Parts: A Review*. Polymers, 2023. **15**(17): p. 3634.
- [26]. Seidi, F., et al., *Crystalline polysaccharides: a review*. Carbohydrate Polymers, 2022. **275**: p. 118624.
- [27]. Bourmaud, A., *Towards high-performance biocomposites for targeted applications*. 2017, Université Bretagne Sud.
- [28]. Mohit, H. and V. Arul Mozhi Selvan, *A comprehensive review on surface modification, structure interface and bonding mechanism of plant cellulose fiber reinforced polymer based composites*. Composite Interfaces, 2018. **25**(5-7): p. 629-667.
- [29]. Akhil, U., et al., *A comprehensive review on plant-based natural fiber reinforced polymer composites: fabrication, properties, and applications*. Polymer Composites, 2023. **44**(5): p. 2598-2633.
- [30]. Elfaleh, I., et al., *A comprehensive review of natural fibers and their composites: an eco-friendly alternative to conventional materials*. Results in Engineering, 2023: p. 101271.
- [31]. Ramesh, M., *Flax (Linum usitatissimum L.) fibre reinforced polymer composite materials: A review on preparation, properties and prospects*. Progress in Materials Science, 2019. **102**: p. 109-166.
- [32]. Zhu, S., et al., *Recent advances on bast fiber composites: Engineering innovations, applications and perspectives*. Composites Part B: Engineering, 2024: p. 111738.
- [33]. Martínez, B., E. Bernat-Maso, and L. Gil, *Applications and properties of hemp stalk-based insulating biomaterials for buildings*. Materials, 2023. **16**(8): p. 3245.
- [34]. Kurien, R.A., et al., *Agave-jute fiber-reinforced hybrid composite for lightweight applications: effect of hybridization*. Biomass Conversion and Biorefinery, 2024: p. 1-14.

-
- [35]. Oladele, I.O., et al., *Coconut/coir fibers, their composites and applications*, in *Plant Fibers, their Composites, and Applications*. 2022, Elsevier. p. 181-208.
- [36]. Behera, D., et al., *Fabrication and characterization of industrial biocomposite from cellulosic fibers of *Luffa cylindrica* in a protein based natural matrix*. *Industrial Crops and Products*, 2024. **212**: p. 118328.
- [37]. Shi, J., et al., *Fabrication and application of eco-friendly bamboo self-bonded composites for furniture*. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2023. **11**(20): p. 7833-7843.
- [38]. Samouh, Z., *Textiles à base de fibres naturelles d'origine marocaine pour application matériaux composites*. 2021, Centrale Lille Institut; Université Chouaïb Doukkali. Faculté des sciences
- [39]. Elouaer, A., *Contribution à la compréhension et à la modélisation du comportement mécanique de matériaux composites à renfort en fibres végétales*. Ecole doctorale Sciences, technologies, santé, Reims, 2011.
- [40]. Maiti, S., et al., *Sustainable fiber-reinforced composites: a Review*. *Advanced Sustainable Systems*, 2022. **6**(11): p. 2200258.
- [41]. Komuraiah, A., N.S. Kumar, and B.D. Prasad, *Chemical composition of natural fibers and its influence on their mechanical properties*. *Mechanics of composite materials*, 2014. **50**: p. 359-376.
- [42]. De, B., et al., *A comprehensive review on fiber-reinforced polymer composites: Raw materials to applications, recycling, and waste management*. *Progress in Materials Science*, 2024: p. 101326.
- [43]. Nodehi, M., *Epoxy, polyester and vinyl ester based polymer concrete: a review*. *Innovative Infrastructure Solutions*, 2022. **7**(1): p. 64.
- [44]. Asma, S., *Elaboration des composites cimentaires à base de fibres végétales locales (le diss): caractérisation, durabilité et application au cas de la maçonnerie*. 2015, Université Badji Mokhtar.
- [45]. Gunstone, F.D., *Fatty acid and lipid chemistry*. 2012: Springer.
- [46]. Sedan, D., *Etude des interactions physico-chimiques aux interfaces fibres de chanvre/ciment: influence sur les propriétés mécaniques du composite*. 2007, Limoges.
- [47]. Bourahli, M.E.H., *Caractérisation d'un composite verre époxy*. 2018.
- [48]. Phung, T.A., *Formulation et caractérisation d'un composite terre-fibres végétales: la bauge*. 2018, Normandie Université.
- [49]. dos Santos, V.I., et al., *Ceramics and ceramic composites for biomedical engineering applications via Direct Ink Writing: Overall scenario, advances in the improvement of mechanical and biological properties and innovations*. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 2024. **161**: p. 100841.
- [50]. Bi, M., et al., *Natural fibers as sustainable and renewable materials for green sample preparation*. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 2024: p. 117894.
- [51]. Karthik, K., et al., *State of the art: natural fibre-reinforced composites in advanced development and their physical/chemical/mechanical properties*. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 2024. **52**(7): p. 100415.

-
- [52]. Ali, Z., et al., *Analytical approaches and advancement in the analysis of natural and synthetic fiber: a comprehensive review*. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2024: p. 125164.
- [53]. Kada, D., *Etude de composites bois polymères renforcés par des fibres de carbone*. 2016.
- [54]. Ahmadi, M., et al., *Engineering flame and mechanical properties of natural plant-based fibre biocomposites*. Advanced Industrial and Engineering Polymer Research, 2024.
- [55]. Liang, Z., H. Jiang, and Y. Tan, *A review of thermal treatment for bamboo and its composites*. Green Processing and Synthesis, 2024. **13**(1): p. 20230263.
- [56]. Meddeb, F. (2024). *Caractérisation du comportement d'un composite biosourcé intégrant une couche viscoélastique* (Doctoral dissertation, Le Mans Université; École nationale d'ingénieurs de Sfax (Tunisie)).
- [57]. Chen, Q., Shi, Q., Gorb, S. N., & Li, Z. (2014). A multiscale study on the structural and mechanical properties of the luffa sponge from *Luffa cylindrica* plant. *Journal of biomechanics*, 47(6), 1332-1339.
- [58] Soraya, B. E. N. Z. A. H. R. A., & Ahmed, S. S. (2015). IMPACT DES EAUX SALINES NON CONVENTIONNELLES SUR L'ÉCOPHYSIOLOGIE DU CONCOMBRE CUCUMIS SATIVUS L. CULTIVÉ EN HORS SOL. *Revue Agrobiologia*, 5(2).
- [59] Garcia-Salazar, C., Gildow, F. E., Fleischer, S. J., Cox-Foster, D., & Lukezic, F. L. (2000). Alimentary canal of adult *Acalymma vittata* (Coleoptera: Chrysomelidae): morphology and potential role in survival of *Erwinia tracheiphila* (Enterobacteriaceae). *The Canadian Entomologist*, 132(1), 1-13.
- [60] Mukherjee, P. K., Singha, S., Kar, A., Chanda, J., Banerjee, S., Dasgupta, B., ... & Sharma, N. (2022). Therapeutic importance of Cucurbitaceae: A medicinally important family. *Journal of Ethnopharmacology*, 282, 114599.
- [61] Schimitberger, V. M. B., de Almeida Pratti, D. L., Cavalcanti, L. C., Ramalho, V. F., da Costa, A. P. F., Scherer, R., ... & da Silva, A. G. (2018). Volatile compounds profile changes from unripe to ripe fruits of Brazilian pepper (*Schinus terebinthifolia* Raddi). *Industrial Crops and Products*, 119, 125-131.
- [62] Abderraouf, A. C. H. O. U. R. (2017). *Etude des performances des mortiers renforcés de fibres naturelles: valorisation des plantes locales* (Doctoral dissertation, Doctoral Thesis, Université Aboubakr Belkaïd–Tlemcen).
- [63] Chagnon, C., Moreau, G., Bombardier-Cauffopé, C., Barrette, J., Havreljuk, F., & Achim, A. (2022). Broad-scale wood degradation dynamics in the face of climate change: A meta-analysis. *GCB Bioenergy*, 14(8), 941-958.

[64] CHIMIE, M. E., & KHELIL, A. (2024). UTILISATION DE SUBSTANCES SÉMIOCHIMIQUES POUR PIÉGER LES CHRYSOMÈLES RAYÉES DU CONCOMBRE.

[65] Gillet, H. (1962). Végétation, agriculture et sol du Centre Tchad. Feuilles de Mongo-Melfi-Bokoro-Guera. *Journal d'agriculture traditionnelle et de botanique appliquée*, 9(11), 451-501.

[66] Alhijazi, M., Safaei, B., Zeeshan, Q., Asmael, M., Eyvazian, A., & Qin, Z. (2020). Recent developments in luffa natural fiber composites. *Sustainability*, 12(18), 7683.