



République Algérienne Démocratique et Populaire



Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université Echahid Hamma Lakhdar- EL Oued

Faculté de la Technologie

Département de Génie Mécanique

## MÉMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de

## MASTER

Spécialité : Energétique

Présenté par :

- BENMEBROUK DJEBRANE
- GUEDIRI CHAOUKI

# Étude expérimentale de caractérisation mécanique d'une fibre du matériau composite

Soutenu le : 06/06 /2023

Devant le jury composé de :

Dr: .....

Président

Dr: ZIAN ALI

Examineur

Dr : GHERBI Med Tahar

Encadreur

Année universitaire 2022/2023

# *Remerciements*

*Nous souhaitons exprimer notre gratitude en premier lieu à <<Allah>>, le Tout-Puissant, pour nous avoir accordé la santé, le courage et la volonté nécessaires pour préparer ce mémoire.*

*Nous tenons à remercier chaleureusement notre encadreur, Mr. Gherbi Mohammed Tahar, pour son encadrement, sa disponibilité et son précieux soutien tout au long de notre travail.*

*Nos remerciements vont également à tous les professeurs du département de Génie Mécanique qui ont partagé leur savoir et leur expertise avec nous durant notre parcours.*

*Nous souhaitons également remercier tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à notre projet, et que nous n'avons peut-être pas cités ici. Merci à vous tous.*

# *Dédicace*

*Je dédie ce modeste travail :*

*A celle qui m'a donné la vie et l'envie de vivre*

*A celle qui m'a entouré de sa tendresse, à ma très chère mère.*

*A Celui qui a été toujours là pour moi, à Celui qui m'indique la bonne voie en me rappelant que la volonté est un secret de succès, à mon cher père.*

*A Ma chère Sœur.*

*A Mes très chers frères : Mouad et Djassem.*

*A toutes mes accompagnantes sans exception et spécialement Ziad, Abdou, Youssef, Djamal, Aymen, Haytem, Chaouki, Jipa et Mouaid.*

*Et A tous ceux qui m'ont encouragé à faire mon voyage de succès et d'excellence.*

*En fin, Du fond du cœur, merci à chacun de vous d'avoir fait partie de mon succès.*

*Djebrane*

# *Dédicace*

*Je dédie ce modeste travail à :*

*La source de la tendresse, ma chère maman.*

*Celui qui a illuminé mon chemin, mon cher père.*

*Et à mes chères sœurs et frères, ainsi qu'à toute ma respectée famille.*

*Mon collègue et soutien tout au long de mon parcours académique, Djebrane, et  
à tous mes camarades de classe de la promotion 2023.*

*Et à tous nos professeurs de la Faculté des Sciences et Techniques, en  
particulier à mon superviseur, M. Gharbi Mohammed Taher, qui m'a éclairé  
financièrement et scientifiquement, ainsi qu'à tout le personnel supervisant  
l'évaluation de cet effort. Veuillez corriger les erreurs éventuelles.*

*Chaouki*

## Résume :

L'objectif principal de notre étude est de développer et de caractériser un matériau composite stratifié organique renforcé de fibres de palmier. Nous avons utilisé un mélange composé de résine époxy et de fibres de feuilles de palmier dattier pour notre recherche. Pour la fabrication, nous avons opté pour la méthode du moulage par contact au sein de notre laboratoire universitaire.

Nous avons effectué des essais de traction afin d'étudier différentes propriétés mécaniques et physiques du matériau composite. Les résultats de ces essais nous ont permis de conclure que le matériau composite utilisé dans notre étude présente des caractéristiques acceptables.

**Mots clés :** matériaux composites organiques, fibres végétales, propriétés mécaniques, Propriétés physiques.

## Abstract:

The main objective of our work is to develop and characterize a laminated organic composite material reinforced with palm fiber. The mixture used in our study is obtained by combining epoxy resin and date palm leaf fibers. The manufacturing method we relied on is laboratory-level contact molding.

We conducted a tensile test to study certain mechanical and physical properties, and through this test, we concluded that the composite material used in the study is acceptable.

**Key words:** Organic composite materials, plant fibers, mechanical properties, physical properties.

## الملخص :

الهدف الأساسي لعملنا هذا هو تطوير وتوصيف مادة مركبة صفائحية عضوية مقواة من ألياف ورق نخيل التمر نوع (الغرس). الخليط المستعمل في دراستنا هو عبارة عن مزيج متحصل من خلط الراتنج من نوع ايبوكسي وألياف اوراق النخيل التمر. طريقة التصنيع التي اعتمدنا عليها هي القولية بالتلامس على مستوى المخبر الجامعة.دراسة بعض الخصائص الميكانيكية و الفيزيائية عند إجراء اختبار الشد التي من خلالها استنتجنا ان المادة المركبة المستعملة في دراسة مقبولة.

**الكلمات المفتاحية:** المواد المركبة العضوية،الألياف النباتية،الخصائص الميكانيكية.الخصائص الفيزيائية

# Sommaire

<i>Introduction générale</i> .....	1
<b>Chapitre I : Généralité sur les matériaux composites</b> .....	2
<b>I. Introduction :</b> .....	3
<b>I .1. Recherché Bibliographies des matériaux composites :</b> .....	4
<b>I . 2. Historique :</b> .....	6
<b>I. 3. Définition d'un matériau composite :</b> .....	7
<b>I. 4. Les constituants des matériaux composites :</b> .....	7
<b>I. 4. 1. La matrice :</b> .....	7
<b>I. 4. 1.1. Diffèrent types de matrice:</b> .....	8
<b>I. 4.1.1.1. La matrice organique :</b> .....	8
<b>I. 4.1.1.1.1. Matrices thermodurcissables (TD):</b> .....	8
<b>I. 4.1.1.1.1.1. Résines polyesters :</b> .....	9
<b>I. 4.1.1.1.1.2. Résine époxyde :</b> .....	10
<b>I. 4.1.1.1.1.3. Résine phénolique :</b> .....	10
<b>I. 4.1.1.1.2. Matrices Thermoplastique (TP) :</b> .....	11
<b>I. 4.1.1.1.3. Matrices Thermostable (TS):</b> .....	12
<b>I. 4.1.1.2. La matrice Minérales :</b> .....	12
<b>a) La matrice céramique :</b> .....	12
<b>b) La matrice métallique :</b> .....	13
<b>I. 4.2. Les renforts :</b> .....	13
<b>I. 4.2.1. Différents types de renforts:</b> .....	14
<b>I. 4.2.1.1. La Fibre de verre :</b> .....	14
<b>I. 4.2.1.2. La Fibre de Carbone :</b> .....	14
<b>I. 4.2.1.3. Fibres d'aramides:</b> .....	14
<b>I. 4.2.1.4. Fibre de bore:</b> .....	14
<b>I. 4.2.1.5. Fibres naturelles:</b> .....	15
<b>I. 4.2.1.6. Les fibres d'alfa :</b> .....	15
<b>I. 5. Caractéristiques générales des matériaux composites :</b> .....	16
<b>I. 6. Domaine d'utilisation des matériaux composites :</b> .....	17
<b>I. 7. Avantages et inconvénients des matériaux composites :</b> .....	17
<b>I. Conclusion :</b> .....	18
<b>Chapitre II :</b> <b>Matériels et méthode        ( Les essais mécaniques)</b> .....	19
<b>II. 1. Les essais mécaniques :</b> .....	20
<b>II. 1.1. Essai de traction :</b> .....	20
➤ <b>Module d'élasticité:</b> .....	22

➤ La contrainte de la rupture :	22
➤ Le module d'Young:	22
➤ Allongement à la rupture:	23
II. 1.2. Essai de flexion :	23
II. 1.3. Essai de la dureté :	25
II. 1.4. Essai de compression :	26
II. 1.5. Mesure de l'impact :	27
II. 2. Les essais thermiques :	27
II 2.1. La Conductivité thermique :	28
<b>Chapitre III : Etude Expérimentale</b>	<b>30</b>
III. 1. Préparation et fabrication :	31
III. 1.1. Préparation des Matériaux :	31
III.1.1. A). Traitement chimique :	33
III. 1.2. Matériels :	35
III. 1.3. Préparation des éprouvettes :	38
III. 2. Caractérisation physique :	39
III. 2.1. Préparation des échantillons pour les analyses :	39
III. 2.2.FTR :	40
III. 2.3.DRX :	41
III. 2.4.MEB :	43
III . 3 Procédé d'élaboration des éprouvettes:	44
III 3.1. Dispositif expérimental :	44
III. 4. Résultats et discussion :	45
III. 4.1. Essai de traction :	45
III. 4.2. Essai de flexion 3-points :	47
III. Conclusion :	49
<i>Conclusion Générale :</i>	<i>51</i>

## Liste des figures

Fig. I .1 : Représentation schématique d'un matériau composite	4
Fig. I . 2 : Classification de différentes familles de matrice	5
Fig. I . 3 : Classification de différents types de renforts	10
Fig. I . 4 : Tissu de verre	11
Fig. I . 5 : Roving de verre	11
Fig. I . 6 : Mat de verre	11
Fig. I . 7 : Fibres naturelles	12
Fig. I . 8 : Classification des fibres naturelles	12
Fig. I . 9 : Classification des fibres naturelles	13
Fig. II . 1 : Machine de traction INSTRON 6959	18
Fig. II .2 : Principe de l'essai de flexion	21
Fig. II .3 : Essai de flexion sur machine de flexion	21
Fig. II .4 : Un duromètre type Rockwell	22
Fig. II .5 : Essai de compression d'un cylindre en matériau composite sur une machine d'essai universelle	23
Fig. III .1 : L'échantillon a été prélevé sur le palmier	31
Fig. III .2 : feuilles de palmier Dans leur état verdoyant Avant qu'elles ne perdent leur couleur	31
Fig. III .3 : feuilles de palmier après qu'elles aient perdu leur verdure	31
Fig. III .4 : la résine époxy utilisée	32
Fig. III .5: Le moule utilisée	32
Fig. III .6: Pompe à vide.	33
Fig. III .7 : pesée 500g d'une quantité de sel.	34
Fig. III .8: feuilles de palmier trempées dans de l'eau salée	34
Fig. III .9: pesée 3g d'une quantité de NaOH.	34
Fig. III .10 : feuilles de palmier trempées dans une solution de NaOH.	34
Fig. III .11 : feuilles de palmier laissées à sécher.	34
Fig. III .12 : Disposez les feuilles de palmier sur le molue.	35
Fig. III .13: pesée 187g de résine.	36
Fig. III .14: pesée 81 g de résine.	36
Fig. III .15 : mélangez la résine avec le durcisseur.	36
Fig. III .16 : Mettez le mélange dans un récipient d'eau tiède à 50°C.	36
Fig. III .17 : Le processus de L'infusion sous vide	38
Fig. III .18 : L'échantillon final obtenu	38
Fig. III .19 : Étuve	39
Fig. III .20 : L'échantillon dans étuve	39
Fig. III .21 : four utilisé	39
Fig. III .22: Les deux échantillons après brûlés	39
Fig. III .23: 0,198 g de poudre de KBr.	40

Fig. III.24: 0,198 g de poudre de KBr broyé avec 0,02 g des fibres de feuilles de palmier avec traitement.	40
Fig. III.25: 0,198 g de poudre de KBr broyé avec 0,02 g des fibres de feuilles de palmier sans traitement.	40
Fig. III.26: comprimé à une pression de 70 KN pendant 2 minutes.	40
Fig. III.27: échantillon après pressage.	40
Fig. III.28: Appareil de mesure (FTIR).	40
Fig. III.29: Spectroscopie FTIR de fibres de feuilles de palmier non traitées	41
Fig. III.30: Spectroscopie FTIR de fibres de feuilles de palmier traitées.	41
Fig. III.31: Machine DRX	42
Fig. III.32: Diagrammes de diffraction des rayons X de Feuilles de palmier non traitées	42
Fig. III.33: Diagrammes de diffraction des rayons X de Feuilles de palmier traitées	43
Fig. III.34: Micrographies électroniques à balayage de feuilles de palmier non traitées .	43
Fig. III.35: Micrographies électroniques à balayage de feuilles de palmier traitées .	43
Fig. III.36: Machine d'essai Z250/SN5A.	45
Fig. III.37 : Evolution de la contrainte en fonction de la déformation longitudinale pour l'hybride de fibre de Feuilles de palmier.	46
Fig. III.38 : Dispositif de flexion 3-points.	47
Fig. III.39 : Evolution de la force en fonction du déplacement pour le composite de fiber de Feuilles de palmier.	48

## Liste des tableaux

Tableau I .1 : Principales caractéristiques mécaniques des résines polyesters	6
Tableau I . 2 : Les avantages et les inconvénients de polyesters	7
Tableau I . 3 : Les avantages et les inconvénients de époxydes	8
Tableau I . 4 : Les avantages et les inconvénients de phénoliques	8
Tableau (III.1) : Caractéristiques de la résinée époxy	35
Tableau (III.2) : Dimensions des éprouvettes en (mm).	44
Tableau (III.3) : Les caractéristiques mécaniques du matériau composite Feuilles De Palmier.	46
Tableau (III.4) : Caractéristiques mécaniques du composite fiber de Feuilles De Palmier (Chargement en flexion 3-points).	47

## Liste des abréviations

**TD** : Résines thermodurcissables.

**TP** : Résines thermoplastiques.

**TS** : Résines thermostables.

**MMC** : les composites à matrice métallique.

**CMC** : les composites à matrice céramique.

**OMC** : les composites à matrice organique.

**PMC** : les composites à matrice polymère.

**FTIR** : Fourier Transform Infrared Spectroscopy.

**DRX** : La diffractométrie des rayons X.

**MEB** : la microscopie électronique à balayage

## Liste des symboles

**E** : est le module d'élasticité (MPa).

$\sigma$  : est la contrainte de traction (N/m<sup>2</sup>).

$\epsilon$  : est la déformation correspondante (%).

**F** : Force de traction (N).

**S** : Section rompue (mm<sup>2</sup>).

$\sigma_r$  : Contrainte de rupture (GPa) .

**E** : Module d'Young (MPa).

**L<sub>0</sub>** : Distance entre mords (mm).

**S** : Surface ou section (mm<sup>2</sup>).

$\epsilon$  : La déformation de la longueur des éprouvettes.

**$\Delta L$** : L'allongement des éprouvettes (mm).

**$\Delta l$**  : Allongement à la rupture.

**l<sub>0</sub>** : Longueur initiale de l'éprouvette.

**l** : Longueur finale de l'éprouvette.

**P** : la charge appliquée sur l'éprouvette en (N).

**L** : la distance entre les appuis en (mm).

**b** : largeur de l'éprouvette en (mm).

**h** : l'épaisseur de l'éprouvette en (mm).

**P** : la charge maximale à la flexion en (N).

**L** : la distance entre appuis en (mm).

**f** : la flèche en (mm).

**I** : le moment d'inertie.

**R<sub>c</sub>**: La résistance à la compression.

**F** : la force maximale en (N).

**S** : la section de l'éprouvette en (mm<sup>2</sup>).

**$\alpha_{iu}$** : Résistance au choc d'éprouvettes lisses en kN/m.

**b**: Largeur de l'éprouvette (mm).

**h** : Épaisseur de l'éprouvette en (mm).

**$E_c$** : Énergie absorbée par le choc en joules.

**$\varphi$** : Flux de chaleur, égale à la moitié de la puissance électrique dissipée dans la plaque chaude (W).

**e** : épaisseur moyenne des deux éprouvettes (m) .

**S** : surface de la zone centrale de chauffe (m<sup>2</sup>).

**$\Delta T$**  : Écart de température entre surface chaude et surface froide (K).



***Introduction générale***

## *Introduction générale*

Dans un monde où l'innovation et les avancées technologiques façonnent notre réalité, les matériaux composites occupent une place prépondérante. Leur combinaison unique de propriétés mécaniques exceptionnelles et de légèreté en fait des matériaux de choix dans de nombreux secteurs industriels, de l'aérospatiale à l'automobile, en passant par la construction. Au cœur de ces composites se trouvent les fibres, ces éléments clés qui confèrent une résistance et une robustesse inégalées aux structures. C'est dans ce contexte captivant que ce mémoire se consacre à l'étude de la caractérisation mécanique d'une fibre au sein d'un matériau composite.

Le premier chapitre, constitue notre point de départ. Il offre une vision d'ensemble des concepts fondamentaux liés aux matériaux composites, en présentant les différentes couches constitutives, les mécanismes de renforcement et les principales caractéristiques qui font de ces matériaux des sources de promesses. En comprenant les bases de ces matériaux, nous serons prêts à explorer plus en profondeur l'étude de la caractérisation mécanique des fibres.

Le deuxième chapitre, se concentre sur les techniques et les procédures expérimentales utilisées pour évaluer les propriétés mécaniques des fibres dans les matériaux composites. Nous mettrons l'accent sur les essais mécaniques tels que la traction, la flexion et la compression, en détaillant les équipements et les outils nécessaires pour mener à bien ces essais. Ce chapitre fournira un cadre solide pour mener notre étude approfondie de la caractérisation mécanique des fibres.

Le troisième chapitre, abordera l'application de l'étude de la caractérisation mécanique des fibres dans un contexte réel. Des échantillons composites conformes aux normes et procédures appropriées seront préparés, et les essais mécaniques seront réalisés selon les méthodes définies dans le chapitre précédent. Les résultats seront soigneusement analysés et interprétés afin de tirer des conclusions importantes sur le comportement mécanique des fibres.

En conclusion, ce projet de recherche vise à approfondir notre compréhension de la caractérisation mécanique des fibres dans les matériaux composites. Les chapitres successifs, axés sur les généralités sur les matériaux composites, les matériels et méthodes d'essais mécaniques, ainsi que l'étude expérimentale, nous guideront dans cette exploration passionnante. Les résultats obtenus auront un impact potentiel sur l'industrie des matériaux composites, ouvrant la voie à des avancées technologiques et à de nouvelles opportunités d'application.



**Chapitre I : Généralité  
sur les matériaux  
composites**

## I. Introduction :

Les matériaux composites sont des matériaux fabriqués en combinant deux ou plusieurs matériaux différents pour créer un matériau avec des propriétés améliorées. Ces matériaux sont largement utilisés dans l'industrie automobile, aérospatiale [1], de la construction, des sports et loisirs, et de nombreuses autres industries.

Les matériaux composites sont composés de deux composants de base : une matrice et un renfort. La matrice est un matériau liant qui maintient le renfort ensemble, tandis que le renfort est le matériau qui fournit la résistance et la rigidité au matériau composite.

Il existe différents types de matériaux composites, tels que les composites à matrice métallique (MMC), les composites à matrice céramique (CMC), les composites à matrice organique (OMC) et les composites à matrice polymère (PMC). Chacun de ces types de matériaux composites a des propriétés spécifiques qui les rendent adaptés à des utilisations différentes.

Les avantages des matériaux composites incluent leur faible poids, leur résistance élevée, leur durabilité, leur résistance à la corrosion et leur capacité à être moulés dans des formes complexes. Cependant, ils peuvent être coûteux à fabriquer et nécessitent une expertise spécialisée pour leur conception et leur fabrication

## I .1. Recherché Bibliographies des matériaux composites :

**[1] R. Y. Kim et al** "*Mechanical Characterization of Carbon Fiber Reinforced Polymer Composites for Aerospace Applications*":

Cette article se concentre sur la caractérisation mécanique de composites polymères renforcés de fibres de carbone pour une utilisation dans l'aérospatiale.

**[2] A. M. Al-Maamori et al** "*Characterization of the Mechanical Properties of Glass Fiber Reinforced Polymer Composite Laminates*":

Décrit la caractérisation des propriétés mécaniques de stratifiés composites renforcés de fibres de verre.

**[3] M. J. Navarro et al** "*Mechanical Characterization of a Composite Material with Carbon Fiber Reinforcement*":

Traite de la caractérisation mécanique d'un matériau composite renforcé de fibres de carbone.

**[4] A. J. P. Campos et al** "*Characterization of the Mechanical Properties of Natural Fiber Composites*":

Décrit la caractérisation des propriétés mécaniques de composites à base de fibres naturelles.

**[5] M. C. Niu et al** "*Mechanical Characterization of Glass Fiber/Epoxy Composites under Static and Fatigue Loading*":

Traite de la caractérisation mécanique de composites en fibre de verre / époxy soumis à des charges statiques et de fatigue.

**[6] R. M. Christensen et al** "*Characterization of the Mechanical Behavior of Polymer Matrix Composites*":

Décrit la caractérisation du comportement mécanique des composites à matrice polymère.

**[7] S. Mechab et al** "*Mechanical Properties and Fracture Behavior of Hybrid*

*Composite Materials*" :

Porte sur les propriétés mécaniques et le comportement en rupture de matériaux composites hybrides.

**[8] N. Oudjene et al** "*Effect of Fiber Loading on the Mechanical Properties of Epoxy Composite Materials*":

Étudie l'effet du chargement en fibres sur les propriétés mécaniques des matériaux composites à base d'époxy.

**[9] S. Sahnoune et al** "Experimental Study of the Mechanical Properties of Natural Fiber Reinforced Composites":

Présente une étude expérimentale sur les propriétés mécaniques de composites renforcés en fibres naturelles.

**[10] A. Belbachir et al** "*Characterization and Modeling of the Mechanical Properties of Carbon Fiber Reinforced Polymer Composites*":

Concerne la caractérisation et la modélisation des propriétés mécaniques des Composites à base de polymère renforcé de fibres de carbone.

**[11] A. Tounsi et al** "*Mechanical Properties and Microstructure of Epoxy Composites Reinforced with Carbon Nanotubes*":

Traite des propriétés mécaniques et de la microstructure des composites à base d'époxy renforcés avec des nanotubes de carbone.

## I . 2. Historique :

Les matériaux composites ont une histoire qui remonte à plus de 4000 ans. Dans l'Égypte ancienne, on utilisait des briques fabriquées à partir d'argile et de paille pour renforcer les structures en bois comme les forts et les monuments. Les cultures indigènes d'Asie, d'Europe, d'Afrique et des Amériques utilisaient également des techniques de construction en duplex (utilisant des planches ou des lattes de bois) et en torchis (un mélange de boue, de paille, de cailloux, de chaux, de foin et d'autres matériaux) pour créer des structures composites. Les Mongols, une civilisation avancée, ont été les pionniers de l'utilisation des matériaux composites. À partir d'environ 1200 après J.-C., ils ont commencé à construire des arcs renforcés en bois, en os et en adhésifs naturels, enveloppés de placages de bouleau. Ces arcs étaient plus puissants et plus précis que les simples arbalètes en bois, ce qui a contribué à l'expansion de l'empire mongol de Gengis Khan à travers l'Asie.

L'ère moderne des composites a débuté au XXe siècle avec l'invention des premiers plastiques tels que la bakélite et le vinyle, ainsi que des produits en bois d'ingénierie comme le contreplaqué. En 1935, un autre matériau composite essentiel, la fibre de verre, a été inventé. Elle était beaucoup plus résistante que les composites précédents, pouvait être moulée et façonnée, et était extrêmement légère et durable. La Seconde Guerre mondiale a joué un rôle déterminant dans l'invention de plusieurs matériaux composites dérivés du pétrole, dont beaucoup sont encore utilisés aujourd'hui, notamment le polyester. Les années 1960 ont vu l'introduction de composites plus avancés, tels que le Kevlar et les fibres de carbone. Ces composites offrent plusieurs avantages par rapport aux matériaux métalliques, tels que leur résistance à la fatigue mécanique, leur résistance à la corrosion, leur facilité de mise en œuvre et leur coût réduit.

Cependant, malgré les avancées significatives, la conception des composites demeure encore principalement artisanale, reposant davantage sur l'expérience que sur une approche scientifique explicite. L'évaluation et le calcul des structures composites sont encore largement basés sur le savoir-faire et l'expertise pratique.

### I. 3. Définition d'un matériau composite :

Un matériau composite est formé par la combinaison de deux ou plusieurs composants différents afin d'obtenir des propriétés spécifiques. Ces composants peuvent être de nature variée, tels que des fibres, des résines, des métaux, des polymères ou des céramiques. Les matériaux composites sont largement utilisés lorsque des propriétés particulières, telles que la résistance, la légèreté ou la durabilité, sont requises.

La sélection des composants d'un matériau composite est basée sur les propriétés désirées, puis ils sont associés de manière à optimiser les caractéristiques globales du matériau. Par exemple, des fibres de carbone peuvent être combinées avec une résine pour créer un matériau composite léger et résistant, utilisé notamment dans le domaine aérospatial. Les matériaux composites sont fréquemment employés dans des domaines tels que l'ingénierie, l'aéronautique, l'automobile, les sports et la construction.

### I. 4. Les constituants des matériaux composites :

Les matériaux composites se composent d'un renfort et d'une matrice (Figure 01). Les renforts et de matrices disponibles permet de modéliser les composites en fonction des besoins spécifiques. L'amélioration des propriétés physico-mécaniques de ces matériaux est un élément clé de leur développement industriel.

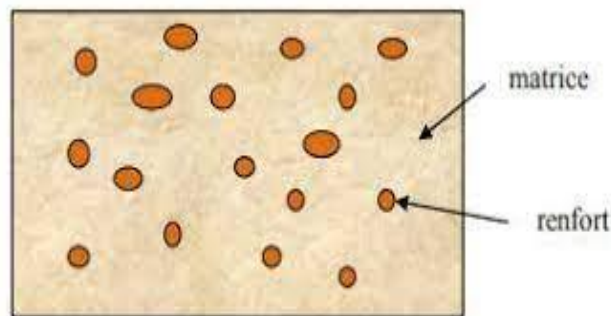
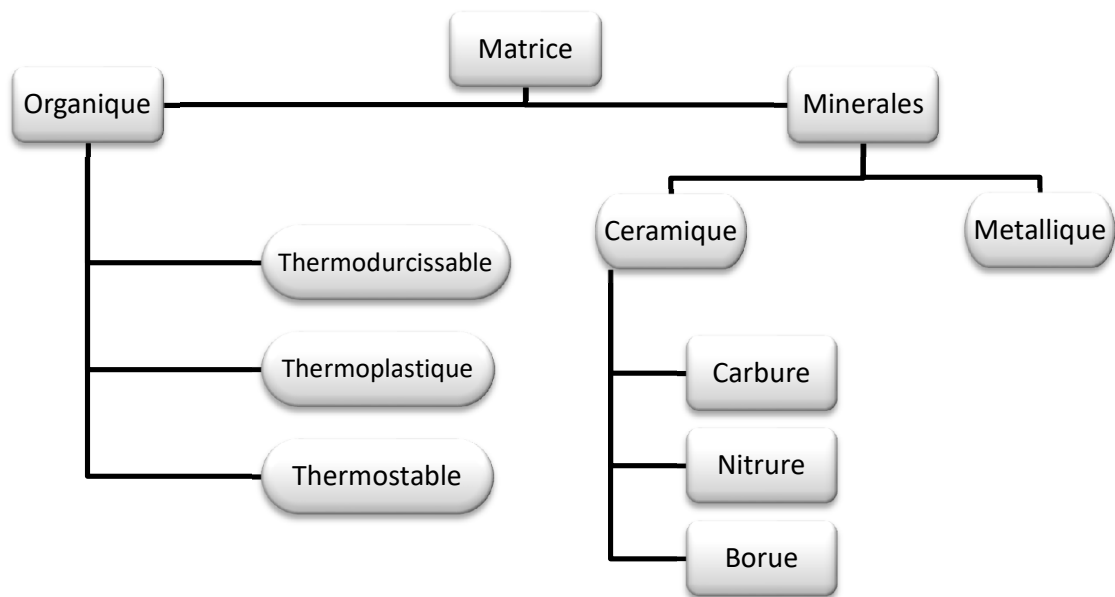


Fig. I .01 : Représentation schématique d'un matériau composite

#### I. 4. 1. La matrice :

La matrice a plusieurs fonctions dans les matériaux composites. Tout d'abord, elle enveloppe les renforts et assure la liaison entre eux. Ensuite, elle transfère les contraintes aux fibres et les répartit dans toutes les directions. Enfin, elle protège les fibres contre les dommages externes et permet la mise en forme souhaitée grâce à un processus de moulage.

La classification des types de matrices couramment rencontrées est donnée sur la **Figure 02**.



**Fig. I 02 : Classification de différentes familles de matrice**

#### **I. 4. 1.1. Différent types de matrice:**

##### **I. 4.1.1.1. La matrice organique :**

Les matrices organiques (MO) sont des matériaux composites constitués d'une matrice et de fibres. Leur utilisation est répandue dans divers secteurs en raison de leurs nombreux avantages. La combinaison de ces deux composants permet de créer un matériau très performant avec des caractéristiques mécaniques intéressantes. On distingue généralement trois types de matrices : les matrices thermodurcissables, les matrices thermoplastiques et les matrices thermostables.

##### **I. 4.1.1.1.1. Matrices thermodurcissables (TD):**

Les résines thermodurcissables (TD) sont généralement utilisées en association avec des fibres longues. Les polymères thermodurcissables adoptent une structure tridimensionnelle lors de la polymérisation, formant un réseau réticulé. Ce réseau se durcit de manière permanente lors du chauffage, prenant ainsi la forme désirée. La transformation est irréversible. Les résines thermodurcissables couramment utilisées de nos jours sont :

### I. 4.1.1.1.1. Résines polyesters :

Les résines polyesters sont les types de résines les plus fréquemment employés dans les applications grand public. Elles se présentent généralement sous forme de solution contenant un polyacide et un polyalcool, et elles durcissent grâce à l'ajout d'un catalyseur et à l'application de chaleur.

Dans l'industrie des matériaux composites, les résines polyesters insaturées sont largement préférées. Leur popularité découle de plusieurs facteurs :

- Leur coût de production est relativement bas.
- Elles offrent une grande diversité, ouvrant ainsi de nombreuses possibilités d'utilisation.
- Elles peuvent être facilement mises en œuvre et automatisées dans les processus de fabrication, ce qui encourage leur adoption croissante dans l'industrie.

Les résines polyesters sont classées en trois catégories en fonction de leur module d'élasticité : souples, semi-rigides et rigides.

En résumé, les résines polyesters sont largement utilisées en raison de leur faible coût, de leur polyvalence et de leur facilité de mise en œuvre. Elles sont classifiées en différentes catégories en fonction de leurs propriétés mécaniques, et leur utilisation continue de se développer dans le domaine industriel des composites.

- Parmi les avantages et les inconvénients des polyesters insaturés, nous retiendrons (Tableau.2) :

**Tableau I . 2 : Les avantages et les inconvénients de polyesters.**

les avantages	les inconvénients
une bonne rigidité résultant d'un module d'élasticité assez élevé	- une tenue médiocre en température : inférieure à 120 °C en service continu,
- une bonne stabilité dimensionnelle	- une sensibilité à la fissuration, essentiellement dans le cas de chocs
une bonne mouillabilité des fibres et des tissus,	- un retrait important de l'ordre de 8 à 10 %
- la facilité de mise en œuvre	un mauvais comportement à la vapeur, à l'eau bouillante avec risque d'hydrolyse, d'où la nécessité de recouvrir les matériaux composites à résines polyesters d'une couche de "gel-coat"

	de manière à les rendre étanches,
- une bonne tenue chimique	- une dégradation à la lumière par les rayons ultraviolets,
- un faible coût de production	- une inflammabilité
une bonne résistance chimique aux hydrocarbures (essence, fuel, etc.) à température ambiante, etc.	- Durée de conservation en pot limitée

**I. 4.1.1.1.2. Résine époxyde :**

Les résines époxydes sont également largement utilisées, après les résines polyesters insaturées. Cependant, leur part de marché dans l'industrie des composites est d'environ 5 %, principalement en raison de leur coût élevé, qui est environ cinq fois supérieur à celui des résines polyesters. Les résines époxydes sont préférées pour les applications nécessitant des composites haut de gamme et spécialisés [5].

Le **tableau.3**. Présente les avantages et les inconvénients des résines époxydes.

**Tableau I . 3 : Les avantages et les inconvénients de époxydes.**

Les avantages	Les inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> <li>- de bonnes propriétés mécaniques (en traction, flexion, compression, choc, fluage, etc.) supérieures à celles des polyesters [8].</li> <li>- une bonne tenue aux températures élevées : jusqu'à 150 °C à 190 °C en continu.</li> <li>- une excellente résistance chimique, - un faible retrait au moulage (de 0,5 à 1 %).</li> <li>-une très bonne mouillabilité des renforts.</li> <li>- une excellente adhérence aux matériaux métalliques.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Prix élevé.</li> <li>- Sensibilité à l'humidité et aux UV.</li> <li>- Vieillessement sous température.</li> <li>- Sensibilité aux chocs.</li> <li>- Temps de polymérisation.</li> </ul>

**I. 4.1.1.1.3. Résine phénolique :**

Les résines phénoliques, considérées comme les premières résines thermodurcissables, ont une longue histoire d'utilisation. Elles présentent de nombreux avantages, notamment une excellente stabilité dimensionnelle, une résistance élevée à la chaleur (ce qui les rend

populaires dans l'industrie ferroviaire), une bonne résistance aux produits chimiques, des propriétés mécaniques solides et un coût relativement bas.

**Le tableau.4.** Présente les avantages et les inconvénients des résines phénoliques.

**Tableau I . 4 : Les avantages et les inconvénients de phénoliques.**

Les avantages	Les inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> <li>- une excellente stabilité dimensionnelle,</li> <li>- une bonne tenue à la chaleur et au fluage,</li> <li>- une bonne résistance aux agents chimiques,</li> <li>- un faible retrait,</li> <li>- de bonnes caractéristiques mécaniques,</li> <li>- un faible coût.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- une mise en œuvre sous pression, donc à faibles cadences,</li> <li>- les couleurs foncées des résines,</li> <li>- une non adaptation à des utilisations alimentaires.</li> </ul>

#### I. 4.1.1.1.2. Matrices Thermoplastique (TP) :

La famille des résines thermoplastiques, également connues sous le nom de "plastiques", est très vaste et peut être divisée en deux catégories : les plastiques courants et les plastiques techniques. Les plastiques courants sont utilisés pour la fabrication d'objets moulés par injection ou de films, plaques, tubes et profilés par extrusion. Les plastiques techniques, quant à eux, sont généralement utilisés dans des applications nécessitant des propriétés spécifiques et sont également mis en œuvre par injection. Parmi les résines thermoplastiques les plus courantes, on trouve le polychlorure de vinyle, le polyéthylène, le polypropylène, le polystyrène, le polyamide, le polycarbonate, etc.

La principale caractéristique des thermoplastiques réside dans leur faible coût, qui résulte à la fois de la disponibilité des matières premières et des procédés de fabrication tels que l'injection et l'extrusion. Cependant, ce faible coût est généralement associé à des propriétés mécaniques [6] et thermomécaniques inférieures par rapport aux matériaux composites à base de résines thermodurcissables ou époxydes.

**I. 4.1.1.1.3. Matrices Thermostable (TS):**

Les résines thermostables se distinguent des autres types de résines par leurs performances thermiques exceptionnelles qui leur permettent de maintenir leurs propriétés mécaniques à des températures supérieures à 200 °C. Elles peuvent être classées dans les deux grandes catégories de résines thermoplastiques et de résines thermodurcissables. Les résines thermostables sont principalement développées dans les domaines de l'aviation et de l'aérospatiale, où les chercheurs travaillent à la création de nouvelles résines.

Parmi les résines thermostables, les résines bismaléimides et les polyimides sont les plus couramment utilisées. Les résines bismaléimides sont caractérisées par la formation d'un réseau moléculaire à des températures comprises entre 180 et 200 °C. Les procédés de moulage utilisés pour ces résines sont similaires à ceux utilisés pour les composites à base de résines thermodurcissables telles que les polyesters ou les époxydes.

Les résines polyimides sont apparues sur le marché dans les années 1970. Elles se caractérisent par leur résistance thermique élevée, mais elles sont également assez coûteuses. Les composites fabriqués à partir de ces résines offrent une résistance supérieure, pouvant atteindre 250 °C, ce qui les rend plus résistants que l'aluminium.

En résumé, les résines thermostables se distinguent par leurs performances thermiques élevées et sont utilisées principalement dans les secteurs de l'aviation et de l'aérospatiale. Les résines bismaléimides et les polyimides sont les plus couramment utilisées dans cette catégorie de résines.

**I. 4.1.1.2. La matrice Minérales :****a) La matrice céramique :**

La matrice céramique est une composante des matériaux composites qui est fabriquée à partir de matériaux céramiques tels que l'oxyde d'aluminium ou le nitrure de silicium. Ces matrices offrent une résistance élevée à la chaleur, à la corrosion et à l'usure, ce qui les rend adaptées à des applications exigeantes. Cependant, elles peuvent être fragiles et plus difficiles à usiner que d'autres matrices.

## b) La matrice métallique :

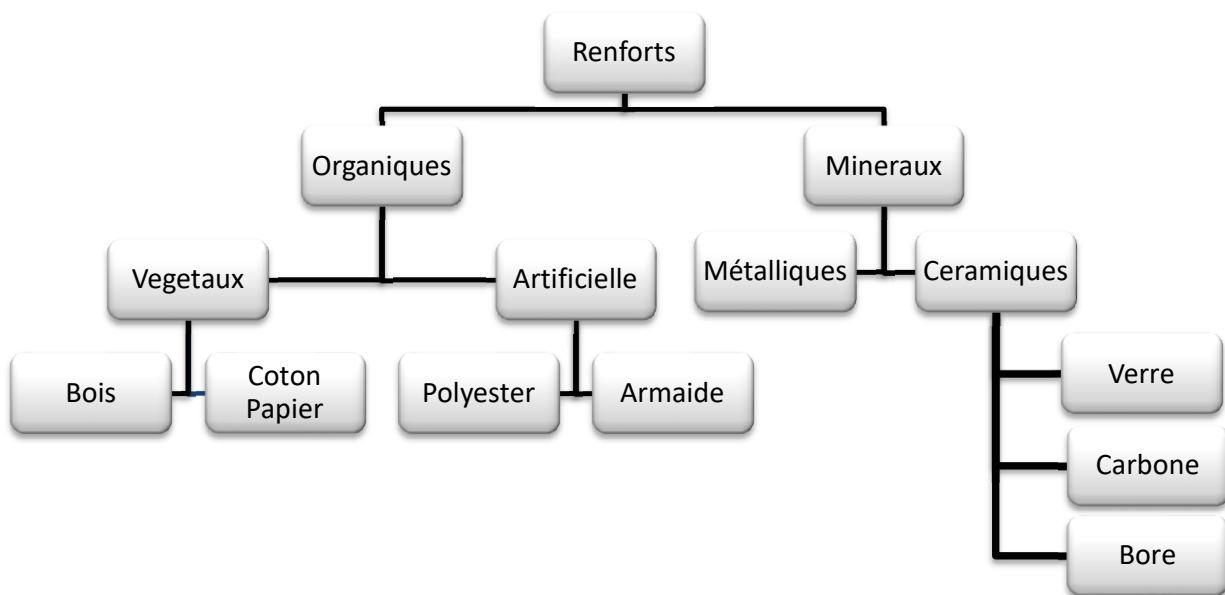
La matrice métallique dans les matériaux composites est constituée d'un métal ou d'un alliage métallique et offre une résistance élevée, une conductivité thermique et électrique élevée. Cependant, son utilisation est limitée en raison de son coût élevé de fabrication et de son poids plus élevé par rapport à d'autres matrices.

### I. 4.2. Les renforts :

L'objectif des renforts dans les matériaux composites est essentiellement d'améliorer leurs propriétés mécaniques telles que la rigidité, la résistance à la rupture, la dureté, etc., et d'améliorer certaines propriétés physiques telles que le comportement thermique, la tenue en température, la résistance au feu, la résistance à l'abrasion, les propriétés électriques, etc.

Le renfort doit également être compatible chimiquement avec la matrice du composite. Il peut se présenter sous différentes formes : fibres courtes ou particules (mat), ou fibres continues (unidirectionnelles, tissus ou structures multidirectionnelles).

La classification de différents types de renforts est donnée sur la **Figure 03**.



**Fig. I . 3 : Classification de différents types de renforts**

### I. 4.2.1. Différents types de renforts:

#### I. 4.2.1.1. La Fibre de verre :

Les fibres de verre sont largement utilisées comme renfort dans les matériaux composites[2] . Elles sont fabriquées à partir de brins continus ou de sections coupées de fil de verre. Les fibres de verre offrent des caractéristiques mécaniques solides [5].

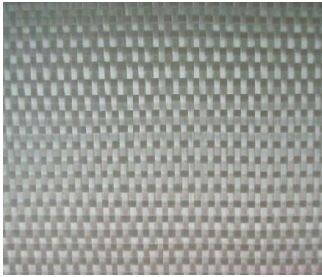


Fig. I . 4 : Tissu de verre

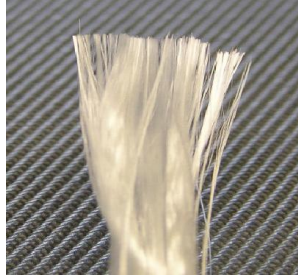


Fig. I . 5 : Roving de verre



Fig. I . 6 : Mat de verre

#### I. 4.2.1.2. La Fibre de Carbone :

Les fibres de carbone sont des matériaux composites composés de fines fibres de carbone extrêmement résistantes et légères. Elles sont utilisées dans divers domaines grâce à leurs propriétés exceptionnelles [10]. Les fibres de carbone se caractérisent par leur haute résistance [3], leur rigidité, leur légèreté et leur conductivité électrique. Elles sont employées dans l'industrie aérospatiale, l'industrie automobile, les sports et loisirs, et contribuent à améliorer les performances et à réduire le poids des systèmes et des structures. Toutefois, leur production et leur traitement peuvent être coûteux, ce qui limite parfois leur utilisation à des applications spécifiques justifiant les coûts supplémentaires.

#### I. 4.2.1.3. Fibres d'aramides:

La fibre d'aramide est issue de la chimie des polyamides aromatiques. Il existe deux types de fibres d'aramide ayant des rigidités différentes :

- La fibre à basse module : utilisée pour les câbles et les gilets pare-balles.
- La fibre à haut module : employée dans le renforcement des composites à haute performance.

#### I. 4.2.1.4. Fibre de bore:

Les fibres de bore sont des matériaux avancés utilisés dans des applications à haute performance. Elles sont fabriquées en déposant du bore en phase vapeur sur un substrat, généralement en

tungstène ou en carbone. Les fibres de bore sont caractérisées par leur légèreté, leur rigidité élevée et leur résistance exceptionnelle à la traction. Elles sont également connues pour leurs excellentes propriétés thermiques et leur résistance aux températures élevées. En raison de leurs caractéristiques uniques, les fibres de bore sont utilisées dans des domaines tels que l'aérospatiale, les applications militaires, les composites renforcés et les systèmes de protection contre les chocs.

#### I. 4.2.1.5. Fibres naturelles:

Les fibres naturelles telles que le lin, le coton... etc, commencent à être utilisées de plus en plus souvent comme fibres de renfort dans les composites (Fig.6). C'est surtout dans le secteur automobile [9] et la construction (profilés de portes et de fenêtres, bardages etc.), plus écologique et faible cout [4].



Fig. I . 7 : Fibres naturelles.

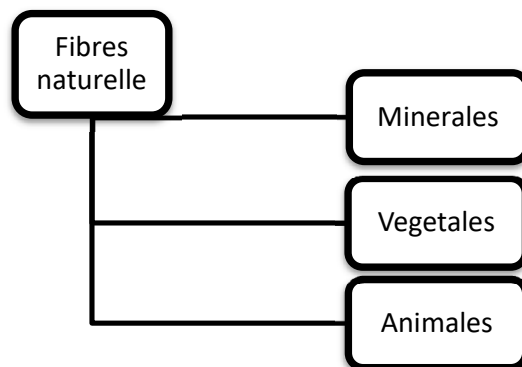


Fig. I . 8 : Classification des fibres naturelles.

#### I. 4.2.1.6. Les fibres d'alfa :

L'alfa, également connue sous le nom de Stipa ou Esparto Grass en latin et en anglais, est une plante vivace de la famille des graminées. Elle pousse abondamment dans la région méditerranéenne occidentale, qui est généralement une région sèche. En raison de sa faible consommation d'eau, l'alfa est bien adapté à ces conditions et forme des nappes de végétation

persistantes qui ne disparaissent pas pendant l'hiver. L'espèce est endémique dans la région méditerranéenne et est particulièrement présente en Afrique du Nord (Figure4), où l'on estime que le Maghreb peut produire annuellement 525 000 tonnes d'alfa.

En Algérie, l'alfa est principalement présenté dans les hautes plaines steppiques, notamment dans la région de Laghouat, Djelfa, Djebel Mâadid, ainsi que dans les régions d'Oran, de Saïda et de Nâama.

➤ **Nomenclature botanique**

Nom vulgaire : L'alfa, en anglais Esparto.

Nom scientifique : *Stipa Tenacissima* L.



**Fig. I . 9 : Classification des fibres naturelles.**

**I. 5. Caractéristiques générales des matériaux composites :**

Les principales caractéristiques des matériaux composites sont :

- Le gain de masse.
- La bonne tenue en fatigue (durée de vie élevée).
- L'absence de corrosion.
- L'absence de plasticité (leur limite élastique correspond à la limite de rupture).
- Le vieillissement sous l'action de l'humidité et de la chaleur.
- L'insensibilité à certains produits chimiques courants (solvants, peinture, huiles, pétroles...).
- Tenue aux impacts et aux chocs très moyenne.
- Très forte anisotropie.

**I. 6. Domaine d'utilisation des matériaux composites :**

De nos jours, les matériaux composites ont pris une place importante dans divers domaines :

- L'industrie aérospatiale.
- Electricité : éoliennes, antennes.
- Le transport aérien, routier et ferroviaire.
- Domaine militaire : Hélicoptère, Fusée, Avions.
- Canalisation.
- Construction navales.
- Sports : ski, raquette de tennis.
- Bâtiment.
- Loisirs.

**I. 7. Avantages et inconvénients des matériaux composites :**

- **Avantage des matériaux composites :** Les composites sont préférés à d'autres matériaux parce qu'ils offrent des atouts liés à :

- . Leur légèreté.
- . Leur résistance à la corrosion et aussi à la fatigue.
- . Leur insensibilité aux produits comme les graisses, les liquides hydrauliques, les peintures et les solvants.
- . Leur possibilité de prendre plusieurs formes, d'intégrer des accessoires et permettre la réduction de bruit

- **Inconvénients des matériaux composites:**

- . Mauvaise isolation acoustique (n'amortissent pas).
- . La tenue au feu n'est pas bonne pour certaines catégories d'âmes.
- . Les risques de flambement sont plus élevés que pour les structures classiques.

## I. Conclusion :

En conclusion, les matériaux composites sont des matériaux synthétiques qui ont révolutionné de nombreuses industries grâce à leurs propriétés uniques et améliorées. Ils sont utilisés dans des applications diverses allant de l'aérospatiale à la construction en passant par l'automobile et le sport. Les composites offrent une combinaison de propriétés mécaniques, physiques et chimiques qui en font des matériaux de choix pour les applications où la performance est primordiale.

Cependant, les matériaux composites peuvent être plus coûteux à produire et à réparer que les matériaux traditionnels, et leur fabrication nécessite souvent des techniques de production spécialisées. Cela peut limiter leur utilisation dans certains cas où les coûts sont un facteur important. Néanmoins, les progrès technologiques continuent d'améliorer la production et la réparation des matériaux composites, et leur utilisation devrait continuer à croître dans de nombreux domaines.

En somme, les matériaux composites ont un rôle important à jouer dans l'industrie moderne, offrant des solutions pour des problèmes de conception et de performance. Les avantages de ces matériaux continuent d'être explorés et développés pour de nouvelles applications et domaines d'utilisation.



**Chapitre II :**  
**Matériels et méthode**  
**(Les essais mécaniques)**

L'objectif de ce chapitre est de présenter les techniques expérimentales les plus fréquentes pour évaluer les propriétés des matériaux composites étudiés, incluant les essais mécaniques (la traction et la flexion...) ainsi que les essais thermiques (tels que la conductivité thermique).

## **II. 1. Les essais mécaniques :**

Les essais mécaniques sont des tests utilisés pour mesurer les propriétés mécaniques des matériaux. Ces tests sont importants pour déterminer la résistance, la durée, la ténacité, la ductilité et les autres propriétés des matériaux qui peuvent être utilisées pour comprendre les produits et les structures.

Les essais mécaniques comprennent :

### **L'essai de traction, Essai de compression, Essai de flexion et L'essai de dureté**

Ces essais sont réalisés à l'aide d'une variété d'équipements d'essais variés, tels que les machines de traction, les machines de compression, les machines de flexion et les testeurs de durabilité. Les résultats des essais sont utilisés pour évaluer la qualité des matériaux et leur aptitude à être utilisés dans des applications spécifiques.

## **II. 1.1. Essai de traction :**

L'essai de traction est une méthode courante pour mesurer la résistance d'un matériau à être étiré ou allongé. Cet essai est souvent utilisé pour caractériser les propriétés mécaniques des métaux, des polymères, des composites et d'autres matériaux [12].

L'objet de cet essai est de définir les concepts de contrainte et de déformation conventionnelles, ainsi que ceux de contrainte et de déformation réelles, ainsi que les courbes de contrainte-déformation réelle et conventionnelle. En plus de déterminer à partir d'une courbe d'essai de traction les caractéristiques mécaniques suivantes :

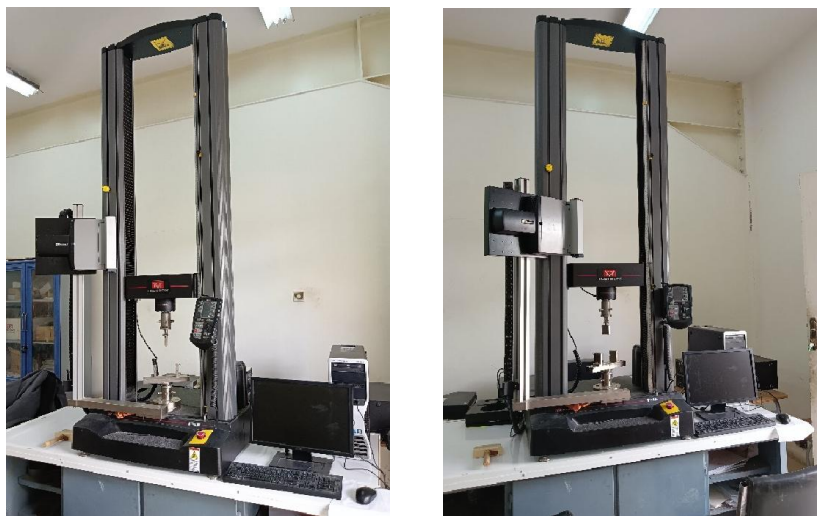
- **Le module d'élasticité (ou module de Young E).**
- **Limite de proportion.**
- **Limite d'élasticité.**
- **La limite conventionnelle d'élasticité.**
- **La résistance à la traction (contrainte ultime).**
- **L'allongement à la rupture.**
- **La striction à la rupture.**

**- Le coefficient de Poisson [13].**

Le principe de l'essai de traction consiste à soumettre une éprouvette du matériau à une force de traction et à mesurer l'allongement  $\Delta L$  correspondant. L'éprouvette est maintenue dans les mâchoires de traction, avec une extrémité fixe et l'autre soumise à une force de traction progressive le long de son axe, jusqu'à ce qu'elle se rompe. Une jauge de déformation (extensomètre) mesure l'allongement. La contrainte obtenue à la force la plus élevée est la résistance à la traction. La limite d'élasticité est la contrainte pour laquelle une déformation plastique spécifique (généralement 0,2 %) est produite. L'allongement est défini par la proportion d'étirement de l'éprouvette avant sa rupture [14].

- Pour réaliser les essais mécaniques de traction, la machine de traction de marque INSTRON 5969 dotée d'une cellule de 10 kN est utilisée. La déformation est mesurée à l'aide d'un extensomètre à pince et le logiciel de commande et d'acquisition de données de la machine permet d'effectuer des séquences de chargement complexes.

Cette machine est disponible au niveau du laboratoire de RDM (résistance des matériaux) du département de génie mécanique de l'université de Biskra Machine d'essai de traction, (figure.1) [15].



**Fig. II . 1 : Machine de traction INSTRON 6959.**

Les caractéristiques mécaniques déterminées par l'essai de traction sont :

➤ **Module d'élasticité:**

C'est le rapport entre la contrainte de traction appliquée sur le matériau et la déformation élastique résultante. Le module d'élasticité permet de quantifier la rigidité d'un matériau et de prédire son comportement sous l'effet d'une charge [16,17]. Il s'exprime comme par la relation (II.1).

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \dots\dots\dots(II.1)$$

Avec :

**E** : est le module d'élasticité (MPa) ;

**$\sigma$**  : est la contrainte de traction (N/m<sup>2</sup>);

**$\varepsilon$**  : est la déformation correspondante (%).

➤ **La contrainte de la rupture :**

C'est la charge de traction supportée par l'éprouvette avant sa rupture, exprimée en unité de force pour une unité de surface [16,17]. Elle est donnée par la relation (II.2).

$$\sigma_r = \frac{F}{S} \dots\dots\dots(II.2)$$

Avec :

**F** : Force de traction (N) ;

**S** : Section rompue (mm<sup>2</sup>) ;

**$\sigma_r$**  : Contrainte de rupture (GPa) ;

➤ **Le module d'Young:**

C'est une mesure de la rigidité d'un matériau et permet de déterminer la résistance à la flexion d'un matériau et de caractériser sa rigidité dans diverses applications. Il est le facteur de proportionnalité entre la contrainte et la déformation [16,17]. Est représenté dans l'équation (II.3).

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{F.L_0}{S.\Delta L} \dots\dots\dots(\text{II}.3)$$

Avec :

**E** : Module d'Young (MPa).

**L<sub>0</sub>** : Distance entre mords (mm).

**S** : Surface ou section (mm<sup>2</sup>).

**ε** : La déformation de la longueur des éprouvettes  $\varepsilon = \Delta L / L_0$ .

**ΔL**: L'allongement des éprouvettes (mm).

➤ **Allongement à la rupture:**

Il s'agit de la variation relative de la longueur initiale d'un échantillon de matériau lorsqu'il se rompt sous une contrainte de traction maximale [16,17], exprimée en pourcentage comme illustrée dans

L'équation (II.4).

$$\varepsilon_r = \Delta I / I_0 (\%) \dots\dots\dots(\text{II}.4)$$

Avec :

**ΔI = I – I<sub>0</sub>**: Allongement à la rupture;

**I<sub>0</sub>** : Longueur initiale de l'éprouvette ;

**I** : Longueur finale de l'éprouvette ;

## II. 1.2. Essai de flexion :

L'essai de flexion est une méthode de test utilisée pour évaluer la résistance et la flexibilité des matériaux. Il est couramment utilisé dans l'industrie pour tester les propriétés mécaniques des matériaux.

Lors de l'essai de flexion, un échantillon est placé sur deux supports, généralement à une distance fixe l'un de l'autre. Une charge est appliquée au centre de l'échantillon, soit par une force appliquée directement, soit par une charge distribuée uniformément sur toute la longueur de l'échantillon. L'échantillon est ensuite plié jusqu'à ce qu'il se fracture ou qu'il atteigne une déformation maximale.

Le comportement de l'échantillon pendant l'essai de flexion est utilisé pour déterminer les propriétés mécaniques telles que le module de flexion, la limite élastique, la limite de rupture et

la ductilité. Ces propriétés peuvent être utilisées pour évaluer la qualité et la durabilité des matériaux, ainsi que pour aider à la conception de produits [18].

L'essai de flexion peut être effectué selon différentes normes et méthodes, selon le matériau testé et l'application prévue. Les résultats de l'essai peuvent varier en fonction des conditions de test, telles que la vitesse de déformation et la température, et doivent donc être interprétés avec soin.

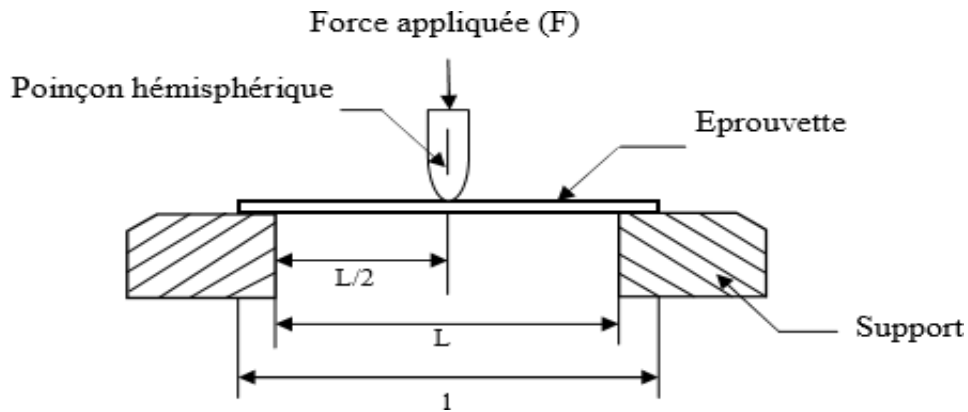


Fig. II .2 : Principe de l'essai de flexion [18]



Fig. II .3 : Essai de flexion sur machine de flexion.

Les différentes caractéristiques peuvent être estimées grâce aux relations ci-dessous ( II .5) et

( II .6).

➤ **La contrainte:**

$$\sigma_f = 3.P. L / 2.b. h^2 \dots \dots \dots ( II .5).$$

Avec :

**P** : la charge appliquée sur l'éprouvette en (N).

**L** : la distance entre les appuis en (mm).

**b** : largeur de l'éprouvette en (mm).

$h$  : l'épaisseur de l'éprouvette en (mm).

➤ **Module de Young de flexion :**

$$E_f = P \cdot L^3 / 6 \cdot f \cdot I \dots \dots \dots (\text{II.6}).$$

Avec :

$P$  : la charge maximale à la flexion en (N).

$L$  : la distance entre appuis en (mm).

$f$  : la flèche en (mm).

$I$  : le moment d'inertie =  $bh^3 / 12$ .

**II. 1.3. Essai de la dureté :**

La dureté est une propriété mécanique des matériaux qui mesure leur résistance à la déformation plastique permanente, c'est-à-dire leur capacité à résister à la pénétration ou à l'indentation. Cette propriété est importante dans de nombreux domaines, notamment dans l'industrie des matériaux.

Il existe plusieurs méthodes pour mesurer la dureté des matériaux. L'une des plus courantes est la méthode d'essai de dureté par indentation, où une bille ou un poinçon est enfoncé dans la surface du matériau avec une charge connue, puis la taille de l'indentation est mesurée. La dureté est alors calculée en fonction de la taille de l'indentation et de la charge appliquée [19].

Une autre méthode courante est l'essai de dureté Rockwell, qui utilise un pénétrateur en forme de cône ou de sphère et mesure la profondeur de pénétration dans le matériau à l'aide d'un indicateur de profondeur. La dureté est ensuite calculée en fonction de la profondeur de pénétration et de la charge appliquée [20].

Il convient de noter que la dureté n'est pas toujours corrélée avec d'autres propriétés des matériaux, telles que la résistance à la traction ou la ténacité. Par conséquent, il est important de sélectionner la méthode d'essai appropriée en fonction des propriétés spécifiques que l'on cherche à mesurer.



**Fig. II .4 : Un duromètre type Rockwell.**

## **II . 1.4. Essai de compression :**

L'essai de compression est une méthode pour évaluer la résistance des matériaux à une charge appliquée en compression. Cette méthode est utilisée pour mesurer la résistance à la compression de l'échantillon et pour déterminer les propriétés mécaniques du matériau, y compris la résistance et la rigidité. Les échantillons de matériaux composites sont généralement cylindriques ou rectangulaires et sont soumis à une force axiale qui est appliquée uniformément sur la surface de l'échantillon. La résistance à la compression est calculée en divisant la force maximale appliquée par la section transversale de l'échantillon. L'essai de compression des matériaux composites est important pour évaluer la résistance des matériaux utilisés dans les industries de l'aérospatiale, de l'automobile et du sport, où la résistance et la rigidité sont des propriétés clés pour garantir la sécurité et les performances [21].



**Fig. II .5 : Essai de compression d'un cylindre en matériau composite sur une machine d'essai universelle.**

La résistance à la compression définie par la relation ( II .7) :

$$R_C = F/S \dots \dots \dots ( II .7).$$

Avec :

**R<sub>C</sub>** : La résistance à la compression.

**F** : la force maximale en (N).

**S** : la section de l'éprouvette en (mm<sup>2</sup>).

## II . 1.5. Mesure de l'impact :

La mesure de l'impact est une méthode d'évaluation de la force ou de l'énergie générée lorsqu'un objet en mouvement entre en collision avec un autre objet. Cette mesure est couramment utilisée pour évaluer la résistance et la durabilité des matériaux et des structures aux chocs et aux impacts, ainsi que pour évaluer la sécurité et la fiabilité des produits. Les résultats de la mesure de l'impact sont exprimés en termes de force ou d'énergie et peuvent être utilisés pour concevoir des structures et des matériaux résistants aux impacts [22].

On mesure la résilience du matériau (exprimée en kJ/m), à partir de la relation :

$$a_{iu} = E_c / b \cdot h \dots \dots \dots ( II .8).$$

Avec :

**a<sub>iu</sub>**: Résistance au choc d'éprouvettes lisses en kN/m.

**b**: Largeur de l' éprouvette (mm).

**h** : Épaisseur de l'éprouvette en (mm).

**E<sub>c</sub>**: Énergie absorbée par le choc en joules [22].

## II . 2. Les essais thermiques :

Les essais thermiques sont des techniques utilisées pour mesurer les propriétés thermiques des matériaux. Ces propriétés peuvent inclure la conductivité thermique. Cet essai sont couramment utilisés dans de nombreux domaines, tels que l'ingénierie, la science des matériaux, la physique, la chimie et la biologie. Les résultats des essais thermiques sont utilisés pour

optimiser la conception de produits et de processus, pour caractériser les matériaux, pour étudier les propriétés thermiques des systèmes complexes, pour évaluer la sécurité et la fiabilité des matériaux et des produits, etc ....

## II 2.1. La Conductivité thermique :

La conductivité thermique est une mesure de la capacité d'un matériau à transférer de la chaleur par conduction. Elle est exprimée en watts par mètre-kelvin (W/m. K) et représente la quantité de chaleur qui est transférée à travers une unité de surface de matériau d'une épaisseur donnée, pour une différence de température donnée entre les deux côtés du matériau. Plus la conductivité thermique d'un matériau est élevée, plus il est capable de transférer la chaleur rapidement [23].

La conductivité thermique est une propriété importante pour de nombreuses applications.

Les essais thermiques sont utilisés pour mesurer la conductivité thermique des matériaux. Il existe plusieurs méthodes pour réaliser ces essais, parmi lesquelles on trouve la méthode de la plaque chauffante, la méthode du fil chaud, la méthode de la sonde, la méthode de la boîte chaude, la méthode du flux de chaleur et la méthode de la coupelle calorimétrique [24].

Le coefficient de conductivité thermique à une température moyenne est déduit par la relation (II.9).

$$\lambda_t = \varphi \cdot e / S \Delta T \dots \dots \dots (II.9).$$

Avec :

$\varphi$ : Flux de chaleur, égale à la moitié de la puissance électrique dissipée dans la plaque chaude (W).

$e$  : épaisseur moyenne des deux éprouvettes (m) .

$S$  : surface de la zone centrale de chauffe (m<sup>2</sup>).

$\Delta T$  : Écart de température entre surface chaude et surface froide (K) [24].

## II. Conclusion :

En conclusion, ce chapitre a présenté un aperçu des techniques expérimentales les plus couramment utilisées pour évaluer les propriétés des matériaux composites. Les essais mécaniques tels que la traction et la flexion, ainsi que les essais thermiques tels que la conductivité thermique, sont essentiels pour comprendre le comportement des matériaux composites. Ces techniques sont utilisées pour mesurer les caractéristiques mécaniques des matériaux, ce qui permet aux ingénieurs et aux chercheurs de sélectionner les matériaux les mieux adaptés à une application spécifique.



**Chapitre III :**  
**Etude Expérimentale**

L'étude des propriétés mécaniques des fibres de matériaux composites est essentielle pour comprendre et améliorer les performances de ces matériaux. Le chapitre III met l'accent sur l'aspect expérimental de la recherche, où nous réaliserons des expériences pour analyser et décrire les propriétés mécaniques des fibres présentes dans le matériau composite étudié.

Nous évaluerons les propriétés mécaniques des fibres étudiées et comprendrons comment elles influencent les performances du matériau composite dans différentes conditions. Nous analyserons des propriétés telles que la résistance, la dureté, l'élasticité et la durabilité, en mettant l'accent sur une mesure précise et en identifiant les facteurs qui les influencent.

**Notre Étude Expérimentale a été réalisée d'atelier de Mécanique à l'Université Echahid Hamma Lakhdar (El-Oued).**

### **III. 1. Préparation et fabrication :**

#### **III. 1.1. Préparation des Matériaux :**

Afin d'obtenir des résultats fiables et de haute qualité, nous avons soigneusement préparé les matériaux utilisés et les avons traités pour atteindre les objectifs souhaités.

**. Collecte des feuilles de palmier :** Tout d'abord, nous avons collecté des feuilles de palmier fraîches en veillant à choisir des feuilles en bon état, sans dommages ni taches. Et puis nous avons séché des feuilles de palmier. Les feuilles de palmier ont été obtenues à partir de palmiers locaux.

Le palmier dont nous avons prélevé l'échantillon est un palmier Palmier-dattier et son âge est de 12 ans.



**Fig. III.1 :** L'échantillon a été prélevé sur le palmier



**Fig. III.2 :** feuilles de palmier Dans leur état verdoyant Avant qu'elles ne perdent leur couleur



**Fig. III. 3 :** feuilles de palmier après qu'elles aient perdu leur verdure

. **Préparation de la résine** : Nous avons utilisé de la résine époxy, disponible dans les magasins en ligne. Nous avons suivi attentivement les instructions du fabricant pour préparer la résine. Cela implique de mélanger deux composants : la résine elle-même et un durcisseur, selon les proportions recommandées



**Fig. III.4 : la résine époxy utilisée**

. **Préparation le moule** : Nous avons utilisé une moule spécialement conçus pour les projets de résine. Avant de les utiliser, nous avons veillé à ce que les moules soient propres et secs.

Le moule que nous avons utilisé, ses dimensions sont les suivantes : Sa longueur est [30 cm] et sa largeur est [20cm].



**Fig. III.5: Le moule utilisée**

Nous avons effectué le processus de L'infusion sous vide. Ce processus permet de durcir la résine époxy tout en éliminant les bulles d'air emprisonnées, ce qui garantit une finition impeccable.

C'est ce qu'il faut préparer Pour réaliser ce processus :

- **Pompe à vide** : Utilisée pour éliminer les bulles d'air piégées dans la résine.



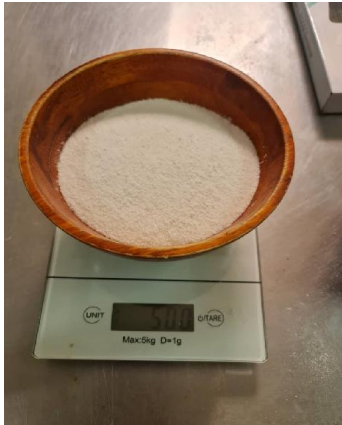
Fig. III.6: Pompe à vide.

- **Papier cuisson ou film plastique** : Utilisé pour protéger la surface de travail et empêcher la résine de coller lors de la préparation des moules.

#### III.1.1. A). Traitement chimique :

Dans cette étape, nous avons trempé nos échantillons de feuilles de palmier dans de l'eau salée (**5 litres d'eau distillée et 500 grammes de sel**) pendant 24 heures. D'entre eux ont ensuite été lavés et trempés à nouveau dans une solution d'**hydroxyde de sodium (NaOH)** que nous avons préparée en ajoutant **3 grammes de NaOH à 5 litres d'eau distillée pendant deux heures (2h)**. Ensuite, nous les avons retirés de la solution et les avons laissés sécher.

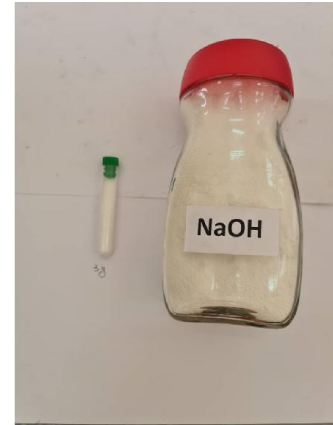
Cette procédure avait pour but de nettoyer les feuilles, d'éliminer les impuretés, la saleté, les bactéries ou les parasites, et également d'adoucir les feuilles. Cela nous a permis d'obtenir une surface propre et facile à manipuler pour les incorporer ultérieurement dans la résine.



**Fig. III.7 : pesée 500g d'une quantité de sel.**



**Fig. III.8: feuilles de palmier trempées dans de l'eau salée**



**Fig. III.9: pesée 3g d'une quantité de NaOH.**



**Fig. III.10 : feuilles de palmier trempées dans une solution de NaOH.**



**Fig. III.11 : feuilles de palmier laissées à sécher.**

### III. 1.2. Matériels :

**Les feuilles de palmier** : Après les avoir recueillies et nettoyées dans une solution de NaOH, disposez les feuilles de palmier à l'intérieur des moules pour obtenir l'effet désiré. Elles doivent être posées à plat et disposées selon le moule utilisé.



**Fig. III.12 : Disposez les feuilles de palmier sur le moule.**

**La résine** : La résine utilisée est résinée époxy. Ses caractéristiques sont résumées dans le tableau (III.1).

**Tableau (III.1) : Caractéristiques de la résinée époxy**

Product name	DURACLEAR EPOXY	
Resin type	Urethane/Acrylic	
Specifications		
Item		
Component Density (specific density @ 25°C)	1.12 epoxy ,0.97 hardener	1.12 epoxy ,0.95 hardener
Mix Ratio by volume	2:1	2:1
Mix Ratio by weight	100:43	100:43
Viscosity (A/B/Mixed @ 25 °C)	1850/35/280	1850/25/195
Mixed Density (specific density @ 25°C)	1.07	1.07
Pot Life (@ 25°C)	90 min	360 min
Tack Free Time (@ 35°C)	24 hrs	72 hrs
Color	White	White
PH	7-9	7-9
Recommended Full Cure	7 days @ 25°C	7 days @ 25°C,
Gel time @ 22°C in a 150-gram mass	5.5 hrs	5.5 hrs
Maximum casting depth	1.27-2.54 cm	1.27-2.54 cm
Tensile strength, MPa	56.1	54.5
Elongation, %	6	6.5
Young's modulus, GPa	3.10	3.00

**Durcisseur** : Les résines époxy nécessitent un durcisseur pour catalyser le processus de durcissement. Vérifiez les proportions recommandées, qui consistent à ajouter 81 grammes de durcisseur pour 187 grammes de résine.

- Après mélangez la résine avec le durcisseur, puis chauffez-les à 50°C pendant 5 minutes afin d'obtenir un bon mélange homogène.



Fig. III.13: pesée la résine.



Fig. III.14: pesée le durcisseur.



Fig. III.15 : mélangez la résine avec le durcisseur.



Fig. III.16 : Mettez le mélange dans un récipient d'eau tiède à 50°C.

**L'infusion sous vide:** est un procédé moderne de fabrication de composites qui présente le potentiel de remplacer la méthode traditionnelle. Son principe consiste à appliquer une pression négative pour évacuer l'air du moule tout en aspirant la résine, ce qui permet d'imprégner le renfort de résine. Une fois la couche de résine et la matrice formées, on obtient une structure fibreuse bidimensionnelle avec un taux de frottement volumique des fibres de 30%. Afin de réduire les risques de formation de vides et de porosité dans le matériau, des échantillons

composites ont été créés en utilisant la technique d'injection de résine assistée par le vide (VARI). Les moules utilisés mesurent 20 x 30 cm et ont une épaisseur de 4 mm.

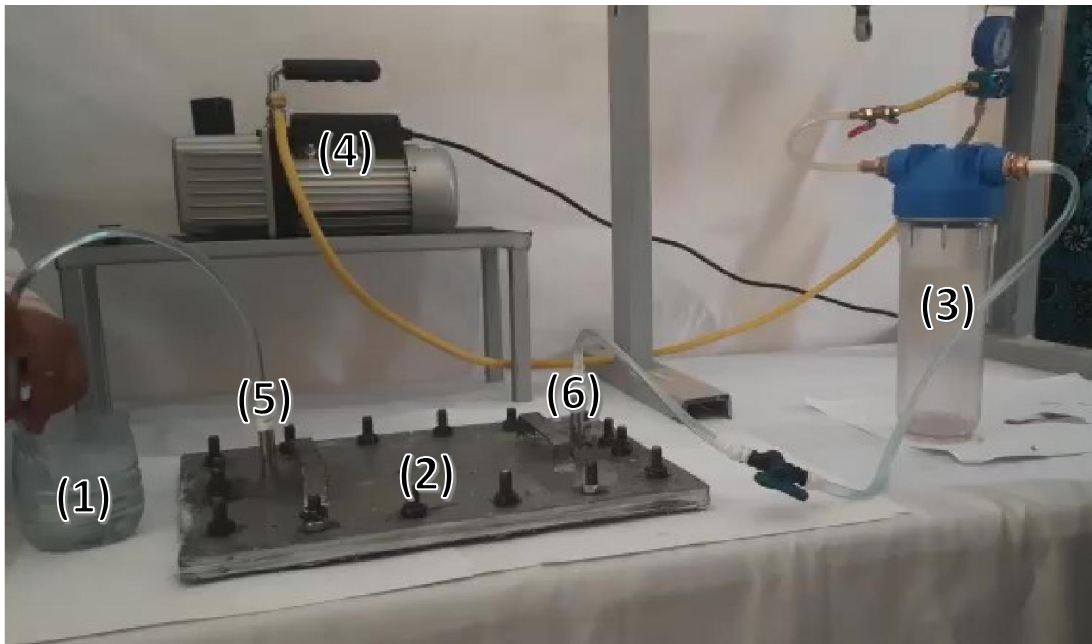
Le processus de fabrication commence par la pesée des fibres en utilisant la proportion pondérale nécessaire. Ensuite, la quantité d'époxy et de durcisseur requise est calculée. Les fibres sont séchées dans un four à 60 °C pendant environ 120 minutes afin d'éliminer les vides, l'humidité et d'assurer une bonne adhérence entre les fibres et la matrice. La surface du moule est soigneusement nettoyée, puis un agent de démoulage (aérosol de silicone) est appliqué sur toute sa surface pour faciliter le retrait ultérieur de l'échantillon et obtenir une excellente finition de surface du produit.

Une fois les fibres préparées, elles sont disposées dans le moule. Le moule est ensuite recouvert d'une autre pièce de moule. Le tuyau d'entrée est fixé à l'endroit où la résine est introduite, tandis que le tuyau de sortie est relié à un piège à résine. Une fois que la pompe à vide est correctement installée dans le circuit, elle est mise en marche. La résine est alors aspirée à travers le tuyau d'entrée et pénètre dans le moule grâce à la différence de pression, se déplaçant jusqu'à la section de sortie.

Après cette étape, le moule est laissé à sécher pendant 48 à 72 heures à température ambiante, avant de procéder délicatement au retrait de l'échantillon de la matrice.

Cette technique d'infusion sous vide permet de produire des composites de haute qualité, en réduisant les risques de défauts tels que les vides et la porosité. Elle offre également une meilleure adhérence entre les fibres et la matrice, ainsi qu'une finition de surface supérieure pour le produit final.

Le processus de L'infusion sous vide présente dans **Le Figure. III.17:**



(1) <b>la résiné</b>	(4) <b>Pompe à vide</b>
(2) <b>le moule</b>	(5) <b>entrée du la résine</b>
(3) <b>Filtre à air</b>	(6) <b>sortie du la résine</b>

Fig. III.17 : Le processus de L'infusion sous vide

### III. 1.3. Préparation des éprouvettes :

Après avoir mélangé la résine époxy et les feuilles de palmier dans le moule, nous le laissons sécher pendant 72 heures. Le résultat obtenu présente dans (**la figure III.18**).



Fig. III.18 : L'échantillon final obtenu

L'échantillon a ensuite été placé dans une étuve à 40°C pendant 24 heures. Pour obtenir un résultat final impeccable et solide. Les matériaux durcis ont été découpés en pièces d'essai standard pour les examens des propriétés des matériaux.



Fig. III.19 : Étuve



Fig. III.20 : L'échantillon dans étuve

## III. 2. Caractérisation physique :

### III. 2.1. Préparation des échantillons pour les analyses :

Brûler deux échantillons de feuilles de palmier utilisés dans l'étude, le premier avant le traitement et le second après le traitement avec NaOH.

La combustion est dans un four à 300 degrés pendant deux heures (2h).

L'un des avantages de la combustion des fibres est l'élimination de la matière organique et des minéraux les plus importants de l'échantillon.



Fig. III.21 : four utilisé



Fig. III.22: Les deux échantillons après des brûlés

### III. 2.2.FTR :

Les chercheurs ont expérimenté une variété de traitements chimiques pour améliorer la teneur en cellulose, les caractéristiques mécaniques, la rugosité de surface, etc., et cette méthode peut être utilisée pour déterminer les changements chimiques se produisant dans les groupes fonctionnels. Analyse utilisant l'infrarouge à transformée de Fourier (FT-IR). Les échantillons 1, 2, représentent des fibres de feuilles de palmier avec et sans traitement Ils ont été examinés par FTIR. Pour étudier les changements de composition chimique, 0,02 g de chaque échantillon a été broyé et mélangé avec 0,198 g de poudre de KBr avant d'être broyé sur un disque de KBr et comprimé à une pression de 70 KN pendant 2 minutes.



**Fig. III.23: 0,198 g de poudre de KBr.**



**Fig. III.24: 0,198 g de poudre de KBr broyé avec 0,02 g des fibres de feuilles de palmier avec traitement.**



**Fig. III.25: 0,198 g de poudre de KBr broyé avec 0,02 g des fibres de feuilles de palmier sans traitement.**



**Fig. III.26: comprimé à une pression de 70 KN pendant 2 minutes.**

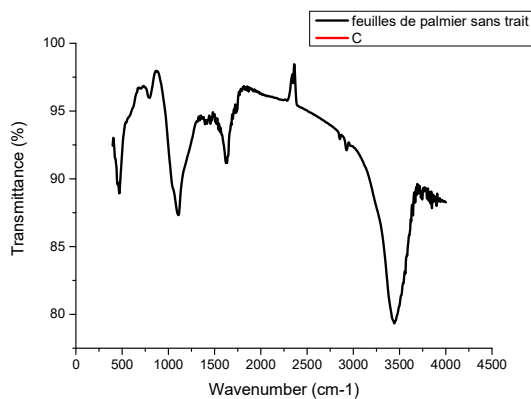


**Fig. III.27: échantillon après pressage.**

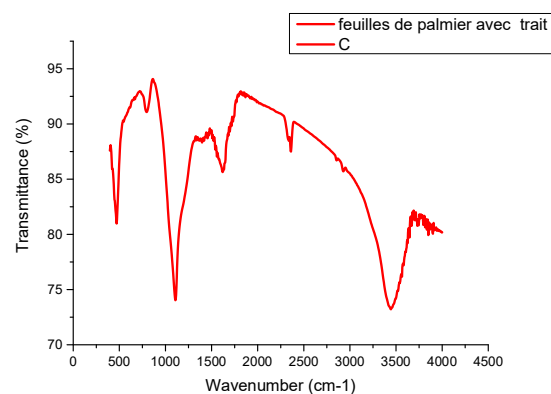


**Fig. III.28: Appareil de mesure (FTIR).**

FTIR utilise une gamme de longueurs d'onde de 400 à 4000  $\text{cm}^{-1}$ , et 20 balayages ont été effectués dans chaque cas. Et voici les résultats obtenus.



**Fig. III.29: Spectroscopie FTIR de fibres de feuilles de palmier non traitées**



**Fig. III.30: Spectroscopie FTIR de fibres de feuilles de palmier traitées.**

Le spectre FTIR de l'échantillon de la fibre feuilles de palmier sans traitement montre un pic intense à la fréquence de 2025.25  $\text{cm}^{-1}$ .

Le spectre FTIR de l'échantillon de la fibre feuilles de palmier traitées montre un pic intense à la fréquence de 864.10  $\text{cm}^{-1}$ .

### III. 2.3.DRX :

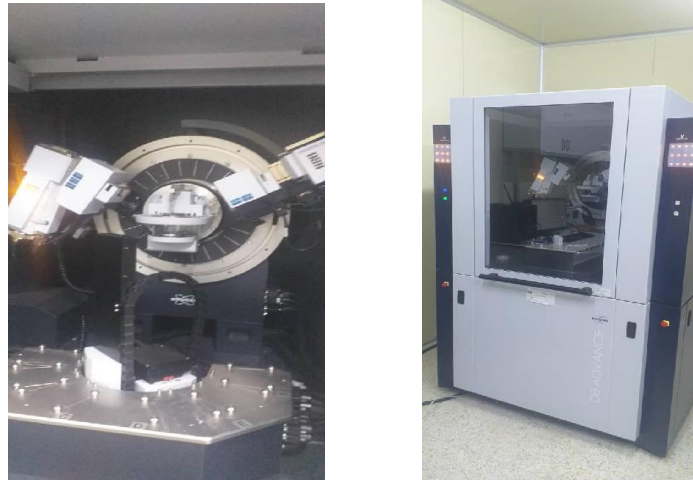
La diffractométrie des rayons X (DRX) est une technique puissante utilisée pour étudier avec précision la structure et la disposition des atomes dans les matériaux.

Lors de l'application du processus DRX aux feuilles de palmier, l'échantillon est exposé aux rayons X émis par la machine DRX. Lorsque les rayons X traversent l'échantillon, la diffraction se produit lorsque les rayons X interagissent avec la disposition des atomes dans les frondes et se dispersent à certains angles. Les rayons diffusés sont enregistrés sous la forme d'un motif diffractométrique.

En analysant le diagramme de diffractométrie, les angles auxquels la diffraction se produit par rapport à la disposition des atomes dans les feuilles de palmier peuvent être déterminés. Cela permet de déterminer la structure du cristal, la disposition des atomes et les distances entre eux.

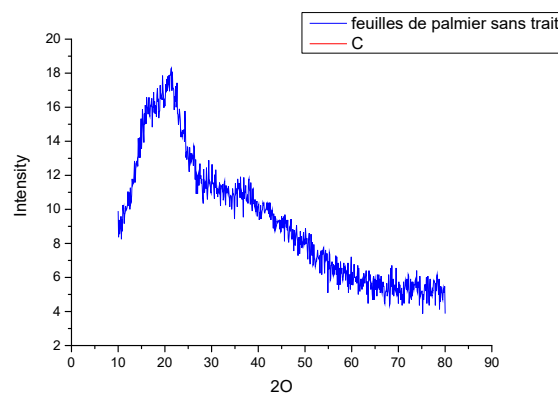
L'application du processus DRX aux feuilles de palmier nous aide à comprendre leurs propriétés structurales, la force de liaison cristalline et les effets potentiels de modifications sur celles-ci. Cela nous aide également à étudier l'effet des traitements et des additifs sur l'arrangement des atomes et les changements de structure des frondes. Cela peut contribuer au développement et à

l'amélioration des utilisations des feuilles de palmier dans des domaines tels que l'industrie du meuble, la construction et l'artisanat traditionnel.



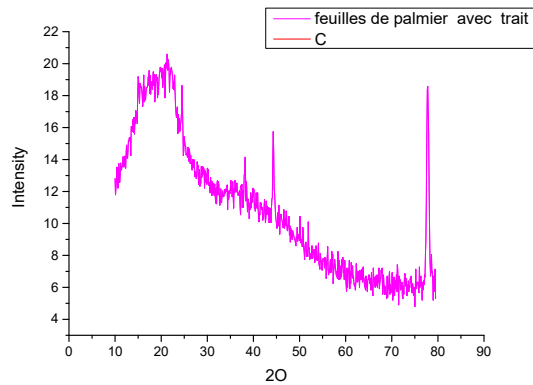
**Fig. III.31: Machine DRX**

Nous avons enregistré le diagramme de diffraction de l'échantillon étudié (feuilles de palmier traitées/feuilles de palmier non traitées) à l'aide de l'outil de diffraction des rayons X, et le graphique présenté sur la figure (Fig. III.32/ Fig. III.33) a été généré à l'aide du logiciel OriginLab 9.1



**Fig. III.32: Diagrammes de diffraction des rayons X de Feuilles de palmier non traitées**

Dans le graphique DRX des feuilles de palmier non traitées, un pic clair est représenté à l'angle de réflexion ( $2\theta$ ) d'environ  $19^\circ$ . Cela indique qu'il n'y a qu'une seule structure cristalline majeure dans l'échantillon. On peut conclure que l'échantillon contient des cristaux de cellulose avec une longueur de réseau cristallin définie.



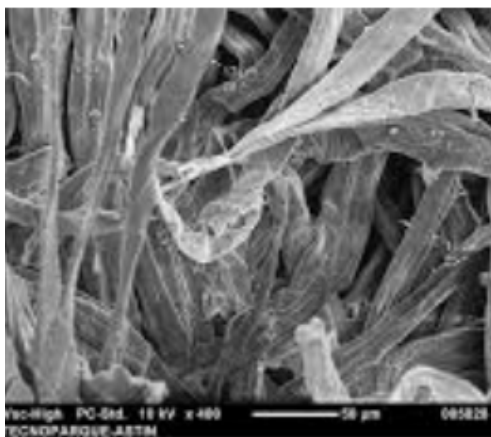
**Fig. III.33: Diagrammes de diffraction des rayons X de Feuilles de palmier traitées**

Le graphique DRX des feuilles de palmier traitées montre des pics majeurs aux angles de réflexion ( $2\theta$ ) autour de  $21^\circ$ ,  $17^\circ$  et  $19^\circ$ , indiquant des changements dans la structure cristalline de l'échantillon à la suite du traitement.

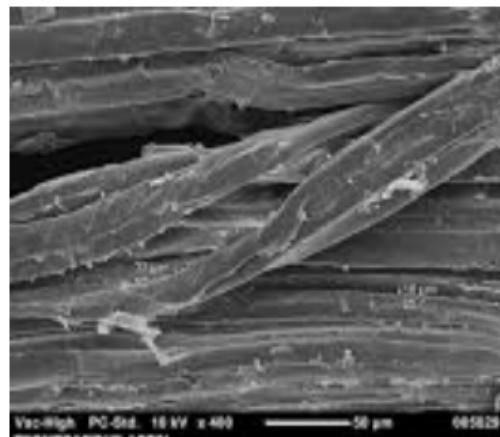
### III. 2.4.MEB :

Un microscope électronique à balayage (MEB) est une technique d'imagerie utilisée pour visualiser des échantillons à l'échelle microscopique à l'aide d'un faisceau d'électrons. Au lieu d'utiliser un microscope optique conventionnel qui utilise la lumière visible, un microscope électronique à balayage utilise des électrons pour former une image détaillée de la surface d'un échantillon.

Nous avons mis un échantillon de feuilles de palmier avant traitement et un échantillon après traitement dans un microscope électronique à balayage, et nous avons obtenu ces images.



**Fig. III.34: Micrographies électroniques à balayage de feuilles de palmier non traitées .**



**Fig. III.35: Micrographies électroniques à balayage de feuilles de palmier traitées .**

La différence entre les deux images microscopiques des feuilles de palmier traitées et des feuilles de palmier non traitées est due aux effets du traitement sur la structure, la structure et les propriétés des feuilles de palmier.

Des changements peuvent être observés dans l'anatomie des frondes, comme la modification de la taille des cellules et des détails des tissus.

### III . 3 Procédé d'élaboration des éprouvettes:

La mise en œuvre des stratifiés se fait par moulage sous pression à température ambiante pendant 24 heures entre un moule et un contre-moule après l'interposition d'un renfort. Les plaques obtenues, d'une dimension de 300 mm \* 200 mm, sont découpées en éprouvettes après un repos de 30 jours selon la norme ASTM D 790-84a pour le test de flexion à trois points et selon la norme ISO 527-4 de type 3 pour le test de traction, à l'aide d'une tronçonneuse équipée d'un disque diamanté lubrifié [25] [26] [27].

Les dimensions moyennes des éprouvettes sont fournies dans le tableau (III.2) :

Tableau (III.2) : Dimensions des éprouvettes en (mm).

	Longueur totale	Longueur entre outillage	Longueur de référence	Largeur	Epaisseur
<b>Traction</b>	<b>250 ± 1</b>	<b>136 ± 1</b>	<b>50 ± 1</b>	<b>25 ± 0.5</b>	<b>5 ± 0.3</b>
<b>Flexion 3-points</b>	<b>90 ± 1</b>	<b>70 ± 1</b>	--	<b>16 ± 1</b>	<b>5 ± 0.3</b>

#### III 3.1. Dispositif expérimental :

Les essais de traction et de flexion sont réalisés à l'aide d'une machine universelle Zwick de type Z250/SN5A, contrôlée par ordinateur et équipée du logiciel Test Xpert V9.0. La machine est équipée d'un capteur de force d'une capacité de 2,5 kN. Elle est connectée à un système d'acquisition de données qui permet l'enregistrement simultané des contraintes et des

déformations lors de l'essai de traction, ainsi que de la force et du déplacement lors de l'essai de flexion (figure III.36).

Au moins cinq éprouvettes sont testées pour chaque type de sollicitation, avec une vitesse d'essai de 2 mm/min.



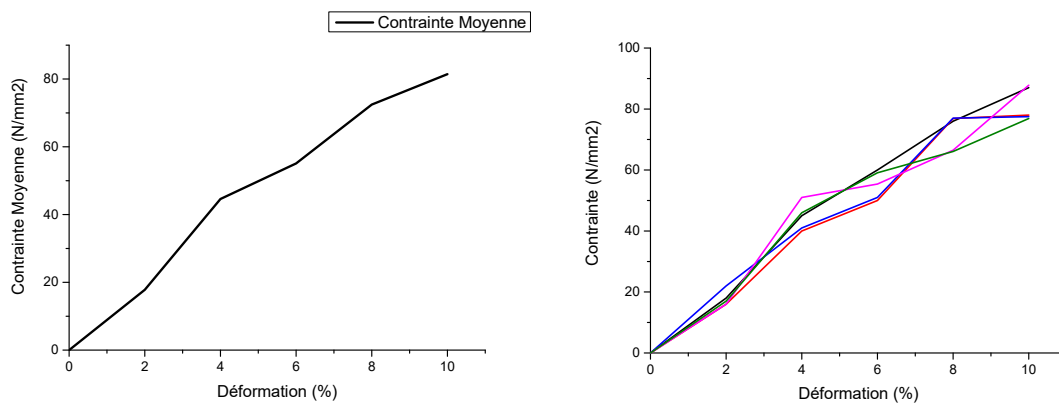
Fig. III.36: Machine d'essai Z250/SN5A.

### III. 4. Résultats et discussion :

#### III. 4.1. Essai de traction :

La figure (III.37) représente l'évolution de la contrainte et la déformation longitudinale. On observe une faible fluctuation entre les différentes éprouvettes, ce qui témoigne de l'homogénéité du matériau fabriqué. En examinant la courbe moyenne, on constate que la contrainte augmente de manière linéaire dans la zone élastique jusqu'à atteindre une valeur d'environ 60 Newtons par  $\text{mm}^2$ . Ensuite, la courbe présente une allure parabolique dans la zone plastique, jusqu'à ce qu'elle atteigne sa valeur maximale d'environ 80 Newtons par  $\text{mm}^2$ .

Déformation %	0	2	4	6	8	10
Contrainte N/mm <sup>2</sup>	0	18	45	60	76	87
Contrainte N/mm <sup>2</sup>	0	16	40	50	76.9	78
Contrainte N/mm <sup>2</sup>	0	22	41	51	77	77.5
Contrainte N/mm <sup>2</sup>	0	16	51	55.4	66.5	87.8
Contrainte N/mm <sup>2</sup>	0	17	46	59.1	66.1	76.9
Contrainte Moyenne N/mm <sup>2</sup>	0	17.8	44.6	55.1	72.46	81.44



**Fig. III.37 : Evolution de la contrainte en fonction de la déformation longitudinale pour l’hybride de fibre de Feuilles de palmier.**

Les caractéristiques mécaniques du matériau composite Feuilles De Palmier sont regroupées dans le tableau III.3.

**Tableau (III.3) : Les caractéristiques mécaniques du matériau composite Feuilles De Palmier.**

$\epsilon_{rup}$ [%]	$\sigma_{rup}$ [MPa]	$\epsilon_{max}$ [%]	$\sigma_{max}$ [MPa]	E [GPa]
5.397	70.572	4.932	78.775	16.134

### III. 4.2. Essai de flexion 3-points :

Après avoir effectué une caractérisation de notre matériau sous une charge de traction, nous avons également réalisé une caractérisation en appliquant une charge de flexion à trois points. Les résultats de cette caractérisation sont présentés dans la figure III.38. En examinant la forme de la courbe force-déplacement, nous pouvons observer que la force augmente initialement de manière linéaire (comportement élastique) jusqu'à atteindre une valeur d'environ 600 Newtons. Ensuite, la courbe change de forme (comportement plastique) jusqu'à atteindre une valeur maximale d'environ 870 Newtons, suivie d'une rupture franche.



Fig. III.38 : Dispositif de flexion 3-points.

En ce qui concerne les caractéristiques mécaniques du composite élaboré, nous les présentons dans le tableau III.4.

Tableau (III.4) : Caractéristiques mécaniques du composite fiber de Feuilles De Palmier (Chargement en flexion 3-points).

$\delta_{rup}$ [mm]	$\sigma_{f rup}$ [MPa]	$\delta_{max}$ [mm]	$\sigma_{f max}$ [MPa]	$E_f$ [GPa]
5.811	99.928	5.217	183.168	9.0856

Déplacement en mm	0	2	4	6
Force en N	0	450	680	750
Force en N	0	404	658	772
Force en N	0	351	690	727
Force en N	0	399	775	708
Force en N	0	402	682	710
Force Moyenne en N	0	401.2	697	733.4

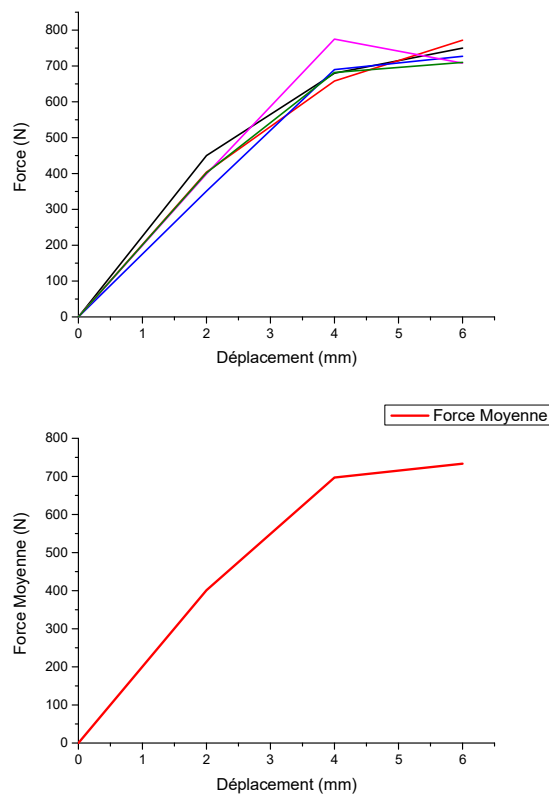


Fig. III.39 : Evolution de la force en fonction du déplacement pour le composite de fiber de Feuilles de palmier.

### III. Conclusion :

Dans notre étude, nous avons réalisé une caractérisation mécanique expérimentale d'un nouveau matériau composite constitué de feuilles de palmier et d'époxy, en utilisant deux types de chargement : traction et flexion à trois points.

À partir des résultats obtenus, nous pouvons tirer les conclusions suivantes. Lors de l'essai de traction, la relation entre la contrainte et la déformation longitudinale présente deux comportements distincts : linéaire et parabolique. En revanche, lors de l'essai de flexion à trois points, la relation entre la force et la flèche au point de chargement évolue de manière linéaire avant de s'incurver.

De plus, nous constatons que les valeurs des constantes de l'ingénieur diffèrent entre l'essai de traction et l'essai de flexion à trois points. Cela indique que les propriétés mécaniques du matériau varient en fonction du type de chargement appliqué.

En conclusion, notre étude expérimentale nous permet d'observer les comportements mécaniques du matériau composite (feuilles de palmier/époxy) sous les sollicitations de traction et de flexion 3-points. Ces résultats contribuent à mieux comprendre les performances et les caractéristiques de ce matériau dans différents scénarios de chargement.



***Conclusion Générale :***

### ***Conclusion Générale :***

L'objectif général de cette étude était d'effectuer une analyse détaillée des propriétés mécaniques du matériau composite spécifié. Les aspects généraux des matériaux composites ont été abordés dans le premier chapitre, tandis que le deuxième chapitre a inclus les détails des matériaux et des méthodes utilisés dans les tests mécaniques. Le troisième et dernier chapitre s'est concentré sur une étude expérimentale complète du matériau composite fabriqué à partir de résine époxy et de fibres de feuilles de palmier.

En conclusion, les résultats suivants peuvent être tirés de cette étude. Il a été observé que la tension varie avec la déformation longitudinale selon deux modes (linéaire et courbé) lors du test de traction, tandis que la force varie de manière linéaire avec la charge avant la flexion. En ce qui concerne les constantes d'ingénierie, il a été constaté qu'elles ne sont pas identiques entre le test de traction et le test de flexion à trois points.

En résumé, ce projet a présenté une analyse détaillée et complète visant à déterminer les propriétés du matériau composite étudié. Les résultats obtenus ont fourni une vision approfondie des performances et des capacités du matériau, ce qui offre des informations précieuses pour son utilisation potentielle dans diverses applications. L'utilisation de résine époxy et de fibres de feuilles de palmier en tant que composants clés présente des avantages et des défis spécifiques, qui ont été discutés et analysés dans le cadre de cette étude.

En conclusion, cette étude contribue à accroître les connaissances sur les matériaux composites, en particulier en ce qui concerne les propriétés mécaniques des fibres de feuilles de palmier et de la résine époxy. Les résultats obtenus fournissent une base pour de futures études et le développement de nouvelles applications pour ce matériau composite.

## Références bibliographiques:

- [1] R. Y. Kim et al "Mechanical Characterization of Carbon Fiber Reinforced Polymer Composites for Aerospace Applications".
- [2] A. M. Al-Maamori et al "Characterization of the Mechanical Properties of Glass Fiber Reinforced Polymer Composite Laminates".
- [3] M. J. Navarro et al "Mechanical Characterization of a Composite Material with Carbon Fiber Reinforcement".
- [4] A. J. P. Campos et al " Characterization of the Mechanical Properties of Natural Fiber Composites".
- [5] M. C. Niu et al "Mechanical Characterization of Glass Fiber/Epoxy Composites under Static and Fatigue Loading".
- [6] R. M. Christensen et al "Characterization of the Mechanical Behavior of Polymer Matrix Composites".
- [7] S. Mechab et al "Mechanical Properties and Fracture Behavior of Hybrid Composite Materials".
- [8] N. Oudjene et al "Effect of Fiber Loading on the Mechanical Properties of Epoxy Composite Materials".
- [9] S. Sahnoune et al "Experimental Study of the Mechanical Properties of Natural Fiber Reinforced Composites".
- [10] A. Belbachir et al "Characterization and Modeling of the Mechanical Properties of Carbon Fiber Reinforced Polymer Composites".
- [11] A. Tounsi et al "Mechanical Properties and Microstructure of Epoxy Composites Reinforced with Carbon Nanotubes".
- [12] J.B. Sauvage, « Caractérisation et modélisation de l'adhérence dans les assemblages collés », Thèse de doctorat, Université de haute alsace, 2016, p185.
- [13] G. Belhi, « polycopie de resistance des matériaux pour deuxième année tronc commun. », Travaux pratiques, Université mohamed khider – Biskra, 2017, p45.
- [14] A. Bounadja, « Etude expérimentale du comportement mécanique des stratifiés à renfort métallique sollicités en flexion 3 points. », Mémoire de magister, Université m'hamed bouguerra boumerdes, 2006, p84.
- [15] S. Boughediri, « Réalisation d'un nouveau matériau biocomposite à base de matrice résine », mémoire de master, Université Mohamed Khider de Biskra, 2019, p88.

- [16] N. T. Doyen, « Etude expérimentale et numérique du comportement thermomécanique de matériaux réfractaires modèles », Thèse de doctorat, Université de Limoges, 2003, p133.
- [17] A. Fadel, « Influence des diverses modifications du Genêt d'Espagne sur les propriétés mécaniques, rhéologiques et thermiques de composites à matrice thermoplastique », Diplôme de magister, Université sétif1, 2014, p106.
- [18] K. Rouam, « Elaboration, caractérisation mécanique et hygrothermique d'un stratifié renforcé par des fibres naturelles », Diplôme de Magister, Université Mehmed bougara boumerdes, 2014, p69.
- [19] A. Berbiti, « Durcissement d'écrouissage et par affinement des grains », Diplôme de Master, Université badji Mokhtar – Annaba, 2017, p62.
- [20] O. Taâmallah, « Effet des traitements mécaniques de surface (TMS) sur l'écrouissage et la ténacité d'un acier », Diplôme de magister, Université badji Mokhtar Annaba, 2012, p115.
- [21] M. Bouznad, M. Karou, « Influence du vieillissement et du recyclé sur les caractéristiques mécaniques d'un matériau composite », Diplôme master, Université mouloud mammeri de Tizi Ouzou, 2014, p94.
- [22] M. Benali, « Effet du traitement thermique des fibres sur les propriétés des composites bois-polymère », Diplôme de Magister, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, 2016, p121.
- [23] M. Merzoud, « Elaboration et caractérisation d'un matériau composite à base de fibres de diss dans la fabrication de la maçonnerie », Thèse de doctorat, Université badji mokhtar-annaba, 2007, p123
- [24] L. Kherbouche, « Introduction aux modélisations et aux méthodes de calcul de matériaux composites », Diplôme de magister, Université mouloud Mammeri Tizi-Ouzou, 2010, p122.
- [25] Broutman L. J. & Sahu S. Composites Materials, testing and design, ASTM STP, pp 170-188, 1972
- [26] Chou P. C. & Croman R. Journal of Composites Materials, testing and design, ASTM STP 674, pp 431-454, 1979
- [27] El Mahi A. Bezazi A. R. & Berthelot J. M. " Influence du type de renfort sur le comportement mécanique en flexion des composites croisés ", 13<sup>ème</sup> Journées Nationales sur les Composites (JNC), Strasbourg (France), 12-14 Mars 2003