

People's Democratic Republic of Algeria  
Ministry of Higher Education and Scientific Research  
Mohamed Boudiaf University of M'sila  
Faculty of Technology



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
جامعة المسيلة  
كلية التكنولوجيا

Département de Génie Mécanique

## MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du diplôme de :

### MASTER

En Génie Mécanique

Option : construction mécanique

Présenté par :

**BENKHERBACHE Mohammed Salim**

**CHORFI Oussama**

**KHARKHACHE Abdelhamid Zaki**

### Thème

## ÉLABORATION DE MATERIAUX COMPOSITES DURABLES A BASE DE FIBRES VEGETALES

Devant le jury composé de :

NOM et Prénom	Grade	Qualité
MENASRI Nouredine	Professeur	Président
SLAMANI Mohamed	Professeur	Encadreur
ROUABHI Youcef	MCA	Examineur

Année Universitaire : 2024 / 2024

N° d'ordre : GM/...../2024



بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

## **Remerciements**

*Nous tenons à remercier Allah pour nous avoir donné la force et la persévérance nécessaires à la réalisation de ce mémoire.*

*Nous tenons à exprimer notre plus profonde gratitude à notre encadrant, **SLAMANI Mohamed**, pour son soutien, ses précieux conseils et son encadrement tout au long de ce travail de recherche. Votre appréciation, votre disponibilité et votre bienveillance ont été d'une aide précieuse pour la réalisation de ce mémoire. Merci pour votre patience.*

*Nos remerciements aux membres du Jury qui nous ont fait l'honneur d'accepter d'évaluer ce modeste travail.*

*Nous tenons à exprimer nos gratitude envers **Dr. ELHADI Abdelmalek** et **Dr. GRAIN Madani** tous ceux qui ont contribué à la réalisation de ce mémoire.*

## *Dédicaces*

*À nos parents,*

*Qui nous ont offert un soutien inconditionnel et une affection sans limite.*

*Vous avez été notre pilier et notre source d'inspiration.*

*Votre amour et vos encouragements nous ont donné la force de persévérer*

*Et d'atteindre nos objectifs.*

*À nos sœurs et frères,*

*Pour leur affection, leur compréhension et leur patience,*

*Et pour être toujours présentes dans les moments de joie comme dans les moments difficiles.*

*À nos amis,*

*Pour leur amitié indéfectible,*

*Leur soutien inestimable et les moments de bonheur partagés.*

## ملخص:

المواد المركبة المدعمة بالألياف النباتية مثل اللوفا والألفا خفيفة الوزن ومتينة، مما يوفر بديلاً بيئياً للألياف الاصطناعية. عند دمجها في مصفوفات مثل الراتنج الإيبوكسي، فإنها تخلق مركبات عالية الأداء وصديقة للبيئة.

تظهر هذه الدراسة أن توافق الألياف مع المصفوفة والتوزيع المتجانس للألياف أمران حاسمان لتحقيق أداء ميكانيكي جيد. باستخدام 5% من اللوفا ونسب مختلفة من الألفا، تكشف الاختبارات الميكانيكية عن إجهاد أقصى يبلغ 38.42 ميغا باسكال عند 5 مم/دقيقة و41.46 ميغا باسكال عند 8 مم/دقيقة. توفر المركبات التي تحتوي على 10% من اللوفا والألفا مقاومة مثلى، على الرغم من أن التركيزات الأعلى تتطلب تعديلات لتجنب تباينات الأداء.

الكلمات المفتاحية: المواد المركبة، الألياف النباتية، الابتكار البيئي، الألياف الطبيعية، ألياف ألفا، ألياف اللوف، استخلاص الألياف، التوصيف الميكانيكي.

## **Résumé :**

Les matériaux composites renforcés de fibres végétales comme le Luffa et l'Alfa sont légers, résistants et durables, offrant une alternative écologique aux fibres synthétiques. Intégrées dans des matrices comme la résine époxy, elles créent des composites performants et respectueux de l'environnement.

Cette étude montre que la compatibilité fibre-matrice et une dispersion homogène sont cruciales pour de bonnes performances mécaniques. Avec 5 % de Luffa et différents pourcentages d'Alfa, les essais mécaniques révèlent une contrainte maximale de 38,42 MPa à 5 mm/min et de 41,46 MPa à 8 mm/min. Les composites avec 10 % de Luffa et d'Alfa offrent une résistance optimale, bien que des concentrations plus élevées nécessitent des ajustements pour éviter des variations de performance.

**Mots clé :** matériaux composites, fibres végétales, innovation environnementale, fibres naturelles, fibres Alfa, fibres Luffa, extraction des fibres, caractérisation mécanique.

## **Abstract:**

Plant fiber-reinforced composites, such as Luffa and Alfa, are lightweight, strong, and durable, providing an eco-friendly alternative to synthetic fibers. When integrated into matrices like epoxy resin, they create high-performance, environmentally friendly composites.

This study shows that fiber-matrix compatibility and homogeneous dispersion are crucial for good mechanical performance. With 5% Luffa and varying percentages of Alfa, mechanical

tests reveal a maximum stress of 38.42 MPa at 5 mm/min and 41.46 MPa at 8 mm/min. Composites with 10% Luffa and Alfa offer optimal strength, though higher concentrations require adjustments to avoid performance variations.

***Keywords:*** composite materials, plant fibers, environmental innovation, natural fibers, Alfa fibers, Luffa fibers, fiber extraction, mechanical characterization.

# *Sommaire*

<b>LA PREMIERE PARTIE .....</b>	<b>13</b>
<b>INTRODUCTION GENERALE .....</b>	<b>14</b>
Introduction.....	15
Contexte .....	15
Problématique : .....	16
Objectifs .....	16
Structure du Mémoire .....	16
<b>LA DEUXIEME PARTIE .....</b>	<b>18</b>
<b>CHAPITRE I L'ETAT DE L'ART .....</b>	<b>19</b>
I.1 Historique.....	20
I.2 Définition de matériaux composites .....	20
I.2.1. Domaines d'application des matériaux composites .....	21
I.2.2. Les derniers avenacés dans le domaine de matériaux composite.....	22
I.3 Classification des matériaux composites .....	23
I.4.1. Matrice .....	24
I.4.1.1. Matrices organiques .....	25
I.4.1.2. Matrices minérales .....	28
I.4.1.3. Le rôle de la matrice.....	28
I.5 Les renforts .....	28
I.5.1 Les grandes familles de fibres .....	29
I.5.2 Architecture de renforcement.....	30
I.6 Incorporation des fibres Alfa dans les matériaux composites.....	31
I.7 Incorporation des fibres de Diss dans les matériaux composites.....	33
I.8 Incorporation des fibres de Luffa dans les matériaux composites .....	34
I.9 Incorporation des fibres de Jute dans les matériaux composites .....	35
I.10 Structure d'un matériau composite .....	36
I.11 Caractéristiques générales d'un composite .....	36
I.12 Avantages et inconvénients des matériaux composites.....	36

<b>CHAPITRE II COMPOSITES A FIBRES NATURELLES .....</b>	<b>38</b>
II.1 Introduction.....	39
II.2 Composites à fibres naturelles .....	39
II.3 Fibres Naturelles .....	40
II.3.1. Classification des fibres naturelles .....	40
II.3.2. Composition des fibres naturelle .....	41
II.3.3. Structure de la fibre naturelle .....	44
II.3.4. Caractéristiques et propriétés des fibres naturelles .....	45
II.3.5. Avantages et inconvénients.....	46
II.3.6. Application des fibres naturelles .....	47
II.3.7. Le potentiel des fibres naturelles en Algérie .....	49
II.3.8. Les fibres Alfa .....	51
II.3.9. Les fibres de DISS.....	52
II.3.10. Les fibres de Luffa.....	53
II.3.11. Les fibres de Jute .....	54
II.4 Procédés de mise en œuvre des matériaux composites.....	54
II.4.1 Moulage au contact .....	54
II.4.2 Moulage sous vide.....	55
II.4.3 Moulage par pultrusion.....	56
II.4.4 Moulage par injection .....	56
II.4.5 Moulage par injection de résine RTM.....	57
II.4.6 Moulage par infusion .....	58
II.4.7 Moulage par centrifugation .....	58
<b>LA TROISIEME PARTIE .....</b>	<b>59</b>
<b>CHAPITRE III MATERIAUX ET METHODES EXPERIMENTALES .....</b>	<b>60</b>
III.1 Introduction.....	61
III.2 Matériaux utilisés.....	61
III.2.1 La matrice .....	61
III.2.2 Les fibres végétales .....	62
III.2.2.1 Les fibres Alfa et Diss.....	62
III.2.2.2 Les fibres de Luffa et Jute.....	64
III.3 Conception et réalisation du moule et plaques .....	65
III.4 Découpages des échantillons et usinages des éprouvettes .....	67

III.5	Plan d'expérience .....	70
III.6	Essai de traction .....	72
<b>LA QUATRIEME PARTIE</b>	<b>.....</b>	<b>74</b>
<b>CHAPITRE IV RESULTATS ET DISCUSSION</b>	<b>.....</b>	<b>75</b>
IV.1	Introduction.....	76
IV.2	Propriétés mécaniques .....	76
IV.2.1	Essai de traction .....	76
IV.2.1.1	Analyse des Caractéristiques Mécaniques des Composites Luffa/Alfa à une Vitesse de Traction de 2 mm/min .....	77
IV.2.1.2	Analyse des Caractéristiques Mécaniques des Composites Luffa/Alfa à une Vitesse de Traction de 5 mm/min .....	85
IV.2.1.3	Analyse des Caractéristiques Mécaniques des Composites Luffa/Alfa à une Vitesse de Traction de 8 mm/min .....	91
<b>CONCLUSION GENERALE</b>	<b>.....</b>	<b>99</b>
	Conclusion Générale .....	100
	Perspectives.....	101
<b>BIBLIOGRAPHIES</b>	<b>.....</b>	<b>102</b>
	REFERENCES .....	107

## *Liste des figures*

Fig I-1 types de nano composite[18].....	22
Fig I-2 Composites intelligents[19].....	22
Fig I-3 Le recyclage des composites[22] .....	23
Fig I-4 Principaux familles des matrices[33] .....	25
Fig I-5 Organigramme des différents types de renfort[46] .....	29
Fig II-1 Structure des fibres naturelles[71]. .....	44
Fig II-2 Applications des CFN : (a) Automobile, (b) Cyclisme, (c) Casque de protection, (d) Instruments de musique, (e) Chaise, (f) Planche de surf[77].....	49
Fig II-5 La plante d'alfa (M'sila-El Hamel).....	51
Fig III-1 la résine et le durcisseur utilisé.....	62
Fig III-2 plante de diss et d'Alfa.....	63
Fig III-3 traitements naturels des plantes d'alfa et diss .....	63
Fig III-4 opération d'extraction des fibres par brossage.....	64
Fig III-5 Fibre de Luffa .....	65
Fig III-6 Fibre de Jute.....	65
Fig III-7 les étapes de réalisation du moule et plaques .....	66
Fig III-8 Découpages des échantillons par une scie automatique .....	67
Fig III-9 Dimension de l'éprouvette de traction. ....	69
Fig III-10 La machine de traction utilisée .....	73

## *Liste des tableaux*

Tableau II-1 Composition des fibres naturelles.....	43
Tableau II-2 Caractéristiques mécaniques des fibres naturelles.....	45
Tableau III-1 caractéristiques de la résine. ....	61
Tableau IV. 1. Pourcentage d'Alfa et de Luffa pour chaque éprouvette .....	77
Tableau IV. 2 Caractéristiques mécaniques du composite hybride Alfa/Luffa à 5% de Luffa et différents pourcentages d'Alfa pour une vitesse de 2 mm/min.....	78
Tableau IV- 3 Caractéristiques mécaniques du composite hybride Alfa/Luffa à 10% de Luffa et différents pourcentages d'Alfa pour une vitesse de 2 mm/min.....	80
Tableau IV- 4 Caractéristiques mécaniques du composite hybride Alfa/Luffa à 15% de Luffa et différents pourcentages d'Alfa pour une vitesse de 2 mm/min.....	81
Tableau IV- 5 Caractéristiques mécaniques du composite hybride Alfa/Luffa à 5% de Luffa et différents pourcentages d'Alfa pour une vitesse de 5 mm/min.....	85
Tableau IV- 6 Caractéristiques mécaniques du composite hybride Alfa/Luffa à 10% de Luffa et différents pourcentages d'Alfa pour une vitesse de 5 mm/min.....	87
Tableau IV- 7 Caractéristiques mécaniques du composite hybride Alfa/Luffa à 15% de Luffa et différents pourcentages d'Alfa pour une vitesse de 5 mm/min.....	88
Tableau IV- 8 Caractéristiques mécaniques du composite hybride Alfa/Luffa à 5% de Luffa et différents pourcentages d'Alfa pour une vitesse de 8 mm/min.....	92
Tableau IV- 9 Caractéristiques mécaniques du composite hybride Alfa/Luffa à 10% de Luffa et différents pourcentages d'Alfa pour une vitesse de 8 mm/min.....	93
Tableau IV- 10 Caractéristiques mécaniques du composite hybride Alfa/Luffa à 15% de Luffa et différents pourcentages d'Alfa pour une vitesse de 8 mm/min.....	95

# ***LA PREMIERE PARTIE***

---

# *Introduction Générale*

**Introduction :**

Les matériaux composites ont transformé divers secteurs industriels grâce à leur combinaison unique de légèreté, de résistance et de polyvalence. Récemment, les composites renforcés de fibres végétales ont attiré une attention croissante en raison de leurs avantages environnementaux et de leur potentiel à remplacer les fibres synthétiques et minérales traditionnelles. En tant que ressources renouvelables et biodégradables, les fibres végétales offrent une alternative plus écologique aux fibres de verre et de carbone, souvent utilisées dans les composites conventionnels.[1]

Les fibres végétales comme le Luffa, le Jute, l'Alfa et le Diss présentent des propriétés mécaniques remarquables qui les rendent attrayantes pour une multitude d'applications industrielles. Ces fibres, disponibles en abondance et à faible coût, possèdent des caractéristiques intrinsèques telles qu'une bonne résistance mécanique, une faible densité et une capacité d'absorption d'énergie, ce qui les rend aptes à diverses utilisations, allant de l'industrie automobile à la construction. Leur intégration dans une matrice polymérique, telle que la résine époxy, permet de créer des matériaux composites performants et respectueux de l'environnement.[2]

La résine époxy est largement reconnue pour ses excellentes propriétés adhésives, sa résistance chimique et sa capacité à répartir efficacement les charges mécaniques, rendant cette matrice particulièrement adaptée pour les composites renforcés de fibres végétales. Cependant, l'incorporation de fibres végétales dans la résine époxy pose des défis spécifiques. Il est crucial de garantir une bonne compatibilité entre les fibres et la matrice, d'assurer une dispersion uniforme des fibres, et de maintenir la durabilité des composites sous diverses contraintes mécaniques et environnementales.[3]

**Contexte :**

Les matériaux composites à base de fibres végétales ont gagné en popularité en raison de leur durabilité, de leur légèreté et de leur impact environnemental réduit par rapport aux matériaux traditionnels. Les fibres végétales sont renouvelables, biodégradables et présentent des propriétés mécaniques intéressantes, ce qui les rend attractives pour des applications dans l'industrie automobile, l'aérospatiale, la construction et d'autres domaines. L'utilisation de ces fibres dans une matrice polymérique, comme la résine époxy, offre une opportunité de créer des matériaux à la fois performants et écologiquement responsables. Cependant, pour maximiser

les avantages de ces composites, il est essentiel de surmonter plusieurs défis techniques et scientifiques.

### **Problématique :**

Malgré leurs nombreux avantages, les matériaux composites à base de fibres végétales peuvent présenter des défis en termes de durabilité et de performance à long terme. Le développement de différents composites hybrides, intégrant diverses combinaisons de fibres végétales comme le Luffa, le Jute, l'Alfa et le Diss, est nécessaire pour identifier les solutions les plus performantes. La résistance mécanique de ces composites hybrides, notamment leur résistance à la traction, doit être suffisante pour garantir leur performance dans des applications industrielles. La qualité de l'interface entre les fibres végétales et la matrice en résine époxy est cruciale pour la transmission efficace des contraintes mécaniques.

De plus, il est essentiel d'assurer une répartition uniforme des fibres dans la matrice pour éviter les zones de faiblesse et garantir des propriétés mécaniques optimales. L'objectif est donc de comparer les caractéristiques mécaniques des différents composites hybrides développés et de sélectionner le meilleur composite en termes de résistance à la traction et de durabilité.

### **Objectifs :**

L'objectif principal de cette recherche est de développer des composites durables en hybridant différentes fibres végétales telles que le Luffa, le Jute, l'Alfa et le Diss, en utilisant une matrice de résine époxy.

Les objectifs spécifiques incluent : optimiser la sélection et l'extraction des fibres pour maximiser leurs propriétés mécaniques ; améliorer les procédés de fabrication pour assurer une dispersion homogène des fibres et une interface fibre-matrice optimale ; évaluer les performances mécaniques des composites résultants par des essais de traction ; comparer les caractéristiques mécaniques des différents composites hybrides développés ; et sélectionner le meilleur composite hybride en termes de résistance à la traction et de durabilité.

### **Structure du Mémoire :**

Le mémoire est structuré de manière à atteindre les objectifs énoncés et à fournir une analyse exhaustive des matériaux composites étudiés.

La première partie, l'introduction générale, présente le contexte, la problématique, les objectifs et la structure du mémoire.

La deuxième partie, la recherche bibliographique, aborde les concepts et généralités des matériaux composites, les propriétés, avantages et défis des fibres végétales, les propriétés et la compatibilité des matrices polymériques avec les fibres végétales, ainsi que les techniques de fabrication et les méthodes de caractérisation des composites.

La troisième partie, matériaux et méthodes, décrit la sélection et le traitement des fibres végétales, la formulation et la préparation des matrices en résine époxy, et les procédés de fabrication des composites.

La quatrième partie, résultats et discussions, analyse les propriétés mécaniques des composites à travers des essais de traction, étudie l'effet de l'hybridation des fibres sur la résistance mécanique.

Enfin, la conclusion et perspectives synthétisent les résultats obtenus, mettent en évidence les contributions à la recherche scientifique et industrielle, et fournissent des recommandations pour les recherches futures. Cette structure détaillée permet de couvrir de manière exhaustive les aspects théoriques et pratiques du développement de composites à base de fibres végétales, en mettant en évidence les défis rencontrés, les solutions proposées et les perspectives d'application industrielle.

## ***LA DEUXIEME PARTIE***

---

# *CHAPITRE I*

## *L'état de L'art*

## **I.1 Historique :**

De nombreuses recherches antérieures ont démontré que les fibres naturelles sont une excellente alternative aux fibres synthétiques utilisées dans les matériaux composites. Depuis plusieurs années, l'intérêt pour l'utilisation des renforts fibreux en général est grandissant en raison de raisons économiques et environnementales.

Toutefois, l'emploi des fibres naturelles comporte un désavantage considérable en raison de leur tendance à être hydrophiles. Par conséquent, il est possible que les matériaux composites se vieillissent en raison de la diffusion des molécules d'eau, ce qui entraîne un effet de gonflement. En outre, il y a un manque d'adhérence entre les fibres naturelles et la matrice.[4]

Il n'est pas nouveau d'utiliser des fibres naturelles comme renfort de polymère. En 1912, George Ellison invente le Tufnol, un composite utilisé pour fabriquer des isolants électriques en imprégnant des fibres de coton dans la Bakélite (résine phénolique). En 1937, De Bruyne substitue les fibres de coton par celles de lin afin de produire des composites pour les avions. Gordon aérolite, le matériau développé, a été employé pour la construction d'un longeron d'aile de 09 mètres de longueur et d'éléments de fuselage d'avion, avec la forme d'un pré-imprégné unidirectionnel lin/phénolique.

On effectue la mise en place en instaurant un cycle de température sous pression. Les performances spécifiques mécaniques (relation entre la résistance (ou la rigidité) et la masse) ont été plus élevées que celles des autres matériaux disponibles.[5, 6]

En 2012, ces nouveaux matériaux suscitent un vif intérêt sur les marchés du transport et du bâtiment. Afin d'atteindre cet objectif, 352 000 tonnes de CRFN ont été produites, étant donné que cette quantité devrait au moins tripler pour atteindre entre 600 et 1000 tonnes d'ici l'an 2020.[7]

## **I.2 Définition de matériaux composites :**

Un matériau composite est constitué de différentes phases nommées renforts et matrice. Lorsque le matériau composite est non endommagé, les renforts et la matrice sont parfaitement liés et il ne peut pas y avoir ni glissement ni séparation entre les différentes phases. Les renforts se présentent sous forme de fibres continues ou discontinues. Le rôle du renfort est d'assurer la fonction de résistance mécanique aux efforts. La matrice assure quant à elle la cohésion entre les renforts de manière à répartir les sollicitations mécaniques. L'arrangement des fibres, leur orientation permettent de renforcer les propriétés mécaniques de la structure.[8, 9]

### I.2.1. Domaines d'application des matériaux composites :

Les matériaux composites sont largement utilisés dans de nombreuses applications en raison de leurs propriétés uniques et de leurs avantages spécifiques. Voici quelques-unes des principales applications des matériaux composites :

- **Industrie aérospatiale** : Les composites sont utilisés dans la construction d'aéronefs pour réduire le poids tout en maintenant la résistance et la durabilité. Ils sont utilisés dans les fuselages, les ailes, les empennages et d'autres composants structurels.[10]
- **Automobile** : Les composites sont utilisés dans l'industrie automobile pour réduire le poids des véhicules et améliorer l'efficacité énergétique. Ils sont utilisés dans les panneaux de carrosserie, les châssis, les sièges et d'autres composants pour améliorer la performance et la sécurité .[11]
- **Construction** : Les composites sont utilisés dans la construction pour leur légèreté, leur résistance et leur durabilité. Ils sont utilisés dans les ponts, les bâtiments, les revêtements de sol, les canalisations et d'autres applications pour améliorer la résistance aux intempéries, la résistance à la corrosion et la durée de vie.[12]
- **Sport et loisirs** : Les composites sont largement utilisés dans l'industrie du sport et des loisirs pour leur légèreté, leur résistance et leur flexibilité. Ils sont utilisés dans la fabrication de raquettes de tennis, de clubs de golf, de planches de surf, de skis, de vélos et d'autres équipements sportifs.[13]
- **Énergie éolienne** : Les composites sont utilisés dans la fabrication de pales d'éoliennes pour leur légèreté, leur résistance et leur durabilité. Ils permettent de produire des pales plus longues et plus efficaces pour capturer l'énergie éolienne.[14]
- **Industrie marine** : Les composites sont utilisés dans la construction navale pour leur résistance à la corrosion, leur légèreté et leur durabilité. Ils sont utilisés dans les coques de bateaux, les ponts, les mâts et autres composants pour améliorer la performance et la longévité.[15]
- **Électrique et électronique** : Les composites sont utilisés dans la fabrication de boîtiers et de composants électroniques pour leur isolation électrique, leur résistance à la chaleur et leur légèreté.[16]

### I.2.2. Les derniers avancés dans le domaine de matériaux composite :

Les nano composites renforcés sont des composites qui sont renforcés par des nanoparticules pour améliorer leurs propriétés mécaniques, thermiques et électriques (voir Fig. I-1).[17]

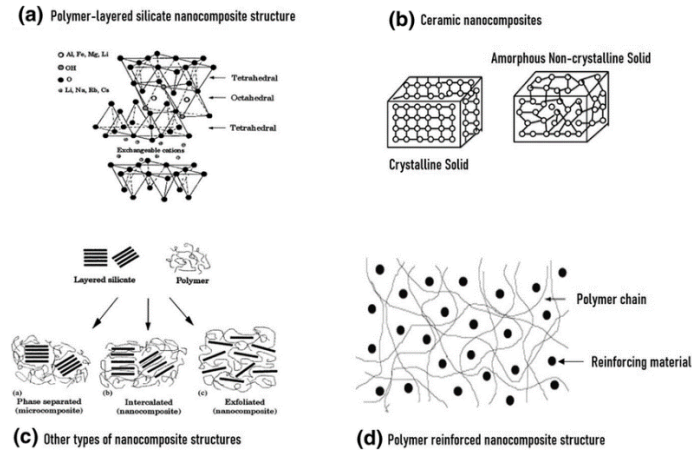


Fig I-1 types de nano composite[18]

Composites intelligents : la création de matériaux composites capables de répondre à des stimuli externes tels que la température, la pression ou les champs électriques ouvre de nouvelles perspectives dans des domaines tels que les capteurs et les actionneurs (voir Fig I-2).

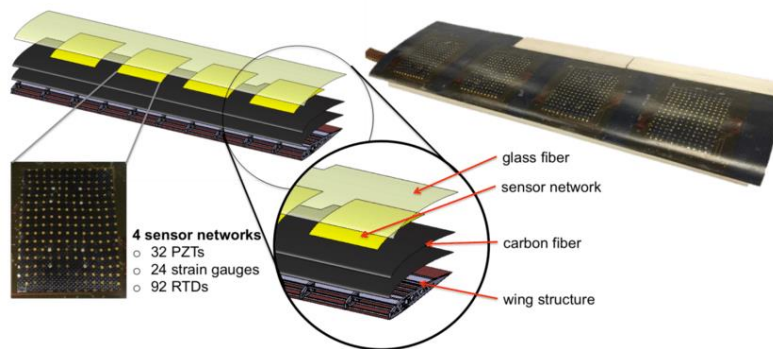


Fig I-2 Composites intelligents[19]

L'impression 3D des composites permet des designs innovants et une production rapide en créant des pièces composites complexes avec une géométrie personnalisée.[20]

Le recyclage des composites : Des techniques de recyclage efficaces ont été développées pour récupérer des matériaux de valeur des composites en fin de vie, ce qui contribue à réduire l'empreinte environnementale de ces matériaux [21](voir Fig I-3).



Fig I-3 Le recyclage des composites[22]

Les composites à base de sources renouvelables telles que les fibres végétales et les résines biosourcées gagnent en popularité car ils offrent une alternative écologique aux matériaux traditionnels dérivés de combustibles fossiles.

Les composites à matrice métallique sont utilisés dans les applications automobiles, aérospatiales et énergétiques en raison de leurs propriétés mécaniques élevées et de leur résistance à la chaleur.[23]

Modélisation et simulation avancées : les techniques de modélisation et de simulation avancées sont utilisées pour prédire et optimiser les propriétés des matériaux composites, ce qui accéléré le processus de conception et de développement.[24]

Ces progrès récents démontrent l'importance croissante des matériaux composites dans divers domaines, offrant des solutions innovantes et des performances améliorées dans diverses applications variées.

### I.3 Classification des matériaux composites :

Les matériaux composites peuvent être classés en fonction de leur nature, de leur structure, de leur mode de fabrication et de leurs propriétés. Voici une classification générale basée sur la nature des matériaux :

- **Composites à matrice polymérique** : Les renforts sont composés de polymères tels que la résine époxy, le polyester ou le polypropylène, qui servent de matrice pour les renforts. Ils présentent une bonne résistance chimique, une légèreté et une facilité de fabrication, mais ils peuvent être sensibles à la température[25].

- **Composites à matrice métallique** : Les renforts sont fabriqués à partir de métaux comme l'aluminium, le magnésium ou le titane. Bien qu'ils offrent une résistance élevée et une conductivité électrique élevées, ils peuvent être corrodés.[26]
- **Composites à matrice céramique** : Les renforts sont composés de céramiques telles que le carbure de silicium, l'oxyde d'aluminium ou le nitrure de silicium, qui servent de matrice pour les renforts. Les produits sont très résistants à la chaleur et à l'usure, mais ils peuvent être fragiles et difficiles à fabriquer.[27]
- **Composites à matrice hybride** : Les matrices sont composées de deux ou plusieurs types de matrices, souvent utilisées pour combiner les avantages des différentes matrices. Un composite à matrice hybride peut utiliser une combinaison de polymères et de métaux pour obtenir des propriétés spécifiques.[28]
- **Composites à renforts naturels** : Il est composé de fibres naturelles comme le bois, le bambou, l'alfa ou la jute. Ils ont une bonne résistance, une légèreté et une durabilité, mais peuvent être sensibles à l'humidité.[29]
- **Composites à renforts synthétiques** : Les renforts synthétiques tels que les fibres de carbone, de verre ou de kevlar peuvent être utilisés. Bien qu'ils offrent une résistance élevée, une faible densité et une grande rigidité, leur production peut être coûteuse.[30]

Cette classification offre une vue d'ensemble des principaux types de matériaux composites en fonction de leurs constituants. Cependant, il existe de nombreuses autres façons de classer les composites en fonction de différents critères, selon les besoins spécifiques de chaque domaine d'application.

#### **I.4 Constitution des matériaux composites :**

##### **I.4.1. Matrice :**

Dans les composites, le terme « matrice » fait référence au matériau solide qui entoure le renfort en une masse compacte. Le rôle principal de la matrice est de maintenir le renfort sous une forme compacte et de donner au produit final la forme souhaitée. Il protège également les fibres de l'abrasion et des environnements agressifs, contrôle l'état de surface et assure le transfert de charge entre les fibres. Les solides formant la matrice peuvent être d'origine métallique, céramique ou polymère.[31]

### I.4.1.1. Matrices organiques :

Le principal objectif de la matrice est de transférer les efforts mécaniques au renfort. Elle garantit la protection du renfort contre les conditions environnementales et permet de conserver le produit fini dans sa forme souhaitée. On peut citer les deux principaux types de matrices utilisés dans les composites à matrices organiques (voir Fig I-4).[32]

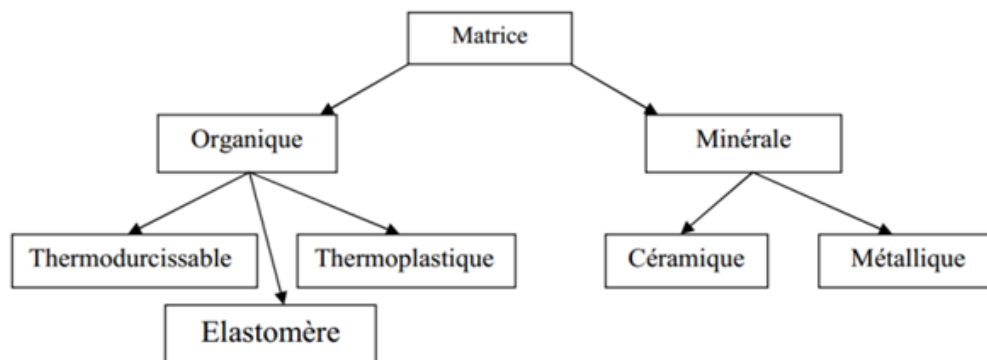


Fig I-4 Principaux familles des matrices[33]

#### a) Matrices thermodurcissables (TD)

Les résines thermodurcissables possèdent des propriétés mécaniques élevées. Ces résines ne peuvent être moulées qu'une seule fois. Ceux-ci se présentent sous forme de polymères non réticulés dissous dans un solvant. Le matériau le plus efficace possède des propriétés mécaniques élevées et une faible densité[34]. Les résines thermodurcissables ont l'avantage d'être pâteuses à température ambiante, ce qui les rend plus faciles à manipuler dans la fabrication des composites. Cependant, les matériaux thermo durcis deviennent infusibles et insolubles après polymérisation, ils ne peuvent donc être moulés qu'une seule fois. Pour cette raison, il n'est pas possible de recycler le sous forme de matière première, mais il est possible par exemple de réintégrer le broyé dans de nouveaux matériaux composites sous forme de charges. D'Après [35], les résines thermodurcissables principalement sont :

##### ➤ Polyesters insaturés

C'est la résine la plus utilisée dans l'application composite de grande distribution. Une résine de polyester insaturé contenant un monomère (généralement le styrène) est réticulée à température ambiante par addition d'un catalyseur de type peroxyde organique et d'un accélérateur. Elle passe successivement de l'état liquide visqueux initial à l'état de gel, puis à l'état de solide infusible[36].

Il existe différents types de résines

- Ortho phtalique : la plus courante.
- Iso phtalique : qui donne une meilleure tenue à l'humidité.
- Chlorée : apportant une auto-exigibilité.
- Bisphénol : possédant de bonnes caractéristiques chimiques et thermiques.
- **Epoxydes**

Ils sont principalement utilisés pour les composites performants. Les propriétés mécaniques, thermiques (130 à 180°C) et chimiques sont excellentes. Cependant, elles sont coûteuses et sensibles à l'humidité et aux rayons UV[37].

- **Polyuréthanes et polyurées**

Ce type de formule est principalement utilisé dans la fabrication de pièces composites, car les formules astrométriques ont une faible viscosité, ce qui permet un bon remplissage du moule[38].

- **Vinylesers**

Il peut être considéré comme une alternative aux polyesters fabriquée à partir d'acides acryliques. Bien qu'elles soient combustibles, elles ont une bonne résistance à la fatigue et un excellent comportement à la corrosion[39].

- **Phénoliques**

Les polyesters et les époxy les concurrencent de plus en plus. Cependant, grâce à leur aptitude à résister au feu, elles maintiennent leur position dominante dans le domaine des températures élevées. Cependant, elles combinent une grande fragilité avec des propriétés mécaniques médiocres[36].

- **Polyimides**

Ces résines sont principalement utilisées dans les composites HP. Bonne stabilité à des températures élevées (plus de 250 °C). Cependant, elles demeurent très onéreuses et difficiles à appliquer[25].

- **Bismaléimides**

Les matrices ne sont pas couramment utilisées en Europe. Bien qu'elles soient difficiles à utiliser, elles offrent une bonne tenue au choc et à la température[40].

## b) Les matrices thermoplastiques

Les chaînes polymères qui sont reliées entre elles par de faibles tensions sont appelées thermoplastiques. Ils peuvent être recyclés et ont au moins un solvant. Les matériaux thermoplastiques. En raison de leur facilité de production, ils représentent le plus grand tonnage en termes de production. Facile à utiliser et peu coûteux, les polymères utilisés sont principalement des thermoplastiques techniques qui présentent de bonnes caractéristiques mécaniques à l'état vierge. Un appui supplémentaire à Les fibres courtes améliore leur tenue thermique et mécanique et leur stabilité dimensionnelle[41].

Les principales matrices thermoplastiques sont les suivantes :

- ❖ **Polyamide (PA)** : tenue au choc, bonne résistance à la fatigue et aux hydrocarbures.
- ❖ **Téréphtalate éthylénique et butylénique (PET, PBT)** : bonne rigidité, bonne ténacité.
- ❖ **Polycarbonate (PC)** : tenue au choc.
- ❖ **Polysulfure de phénylène (PPS)** : résistance à l'hydrolyse.
- ❖ **Polyoxy méthylène (POM)** : bonne tenue à la fatigue.
- ❖ **Poly Polysulfures (PSU et PPS)** : bonne stabilité chimique et à l'hydrolyse, peu de fluage, tenue au chaud.
- ❖ **Polypropylène (PP)** : peu onéreux et assez stable en température, mais combustible.

De plus en plus, on utilise des thermoplastiques thermostables (tenue en température > 200 °C et bonnes propriétés mécaniques), en particulier les suivants :

- ❖ **Polyamide-imide (PAI).**
- ❖ **Polyéther-imide (PEI).**
- ❖ **Polyéther-sulfone (PES).**
- ❖ **Polyéther-éther-cétone (PEEK).**
- ❖ **Polysulfures (PSU et PPS)** : bonne stabilité chimique et à l'hydrolyse, peu de fluage, tenue au chaud.
- ❖ **Polypropylène (PP)** : peu onéreux et assez stable en température, mais combustible.

### c) Les élastomères

Les polymères, qu'ils soient naturels ou synthétiques, ont une structure unique qui leur confère une élasticité significative (jusqu'à 500% par rapport à la taille initiale). Les élastomères tels que les silicones d'élastomères, les polyuréthanes, le néoprène, le latex, etc [42].

#### I.4.1.2. Matrices minérales :

##### a) Matrice métallique

Les matrices métalliques sont encore largement utilisées. Des matériaux composites tels que l'aluminium et ses composants les alliages, tels que le nickel et le titane, ont une excellente conductibilité électrique et thermique, sont très résistants aux températures élevées et ont également de bons traits mécaniques transversaux. Leur production coûte très cher[43].

##### b) Matrices céramiques :

Le silicium et le carbure sont utilisés comme matériaux. Très cher car utilisé pour fabriquer des pièces soumises à des contraintes thermiques[44]

#### I.4.1.3. Le rôle de la matrice :

La matrice a pour rôle de :

- ✓ Lier les fibres de renforts.
- ✓ Répartir les contraintes.
- ✓ Apporter la tenue chimique de la structure.
- ✓ Donner la forme désirée au produit final.

### I.5 Les renforts :

Les renforts dans les matériaux composites jouent un rôle essentiel en fournissant un soutien structurel et en améliorant les propriétés mécaniques telles que la rigidité et la résistance. Ils contribuent également à améliorer d'autres caractéristiques physiques telles que la résistance au feu et la conductivité électrique. Pour être efficaces, les renforts doivent avoir une faible densité, être compatibles avec les matrices et être faciles à manipuler. Ils peuvent provenir de diverses sources, y compris des origines animales, végétales ou synthétiques, et se présenter sous différentes formes telles que des fibres courtes, des particules ou des fibres continues[25].

- ❖ **Renfort en fibres discontinues** : Des fibres courtes, ou particules (charges sous forme de microbilles, de fibres broyées, d'écaillés ou de poudre), permettent d'améliorer certaines propriétés de la matrice (résistance à l'usure, propriétés thermiques, poids). Celle-ci reste l'élément de base et on obtient alors un « polymère renforcé »[45].
- ❖ **Renfort continu** : Sous forme de fibres longues qui sont généralement utilisées poudres composites HP. Cette forme fibreuse offre une résistance à la rupture et souvent un module d'élasticité beaucoup plus élevée que ceux du même matériau massif, avec une augmentation de la longueur de 10000 fois, ou bien pour le même volume, la surface est multipliée par 100 dans le cas des fibres de verre[45].

### I.5.1 Les grandes familles de fibres :

Peuvent être regroupées en plusieurs catégories principales en fonction de leur composition, de leur origine et de leurs propriétés (voir Fig I-5).

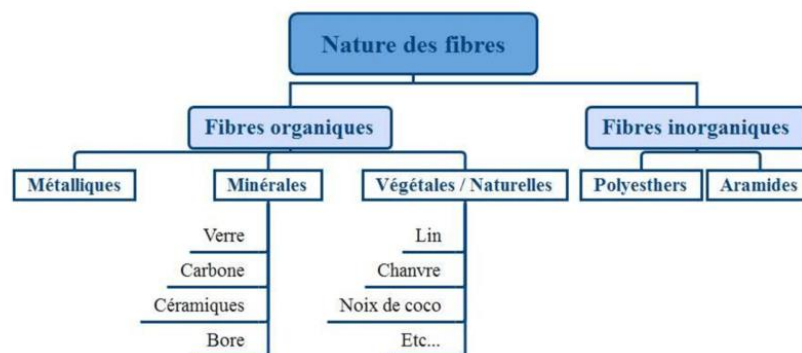


Fig I-5 Organigramme des différents types de renfort[46]

Voici quelques-unes des principales familles de fibres :

- ✓ **Fibres minérales** : Comprend des fibres telles que le verre, le basalte et la céramique. Elles sont fabriquées à partir de matériaux inorganiques et sont souvent utilisées pour leur résistance à la chaleur et à la corrosion[47].
- ✓ **Fibres naturelles** : Comprend des fibres telles que le coton, le lin, le jute, la laine et le bambou. Elles sont dérivées de sources végétales ou animales et sont appréciées pour leur biocompatibilité, leur respirabilité et leur durabilité[48].

- ✓ **Fibres synthétiques** : Comprend des fibres telles que le polyester, le nylon, le polypropylène et l'élasthanne. Elles sont fabriquées à partir de polymères synthétiques et sont largement utilisées dans une variété d'applications en raison de leur résistance, de leur légèreté et de leur faible coût[49].
- ✓ **Fibres de haute performance** : Comprend des fibres telles que le carbone, le kevlar et l'aramide. Elles sont spécialement conçues pour offrir des performances exceptionnelles dans des domaines tels que la résistance à la traction, la résistance aux chocs et la résistance à la chaleur, et sont souvent utilisées dans des applications critiques telles que l'aérospatiale, l'automobile et la défense[50].
- ✓ **Fibres recyclées** : Comprend des fibres fabriquées à partir de matériaux recyclés, tels que les bouteilles en plastique recyclées transformées en fibres de polyester recyclé. Elles sont utilisées dans le cadre d'efforts de durabilité et de réduction des déchets dans l'industrie textile[51].

Ces grandes familles de fibres offrent une variété de propriétés et d'applications, ce qui permet aux fabricants de choisir le type de fibre le mieux adapté à leurs besoins spécifiques en termes de performance, de durabilité et de coût.

### I.5.2 Architecture de renforcement :

Les renforts constitués de fibres peuvent être tissus surfaciques (tissus, mats) (voir Fig I-6), multidirectionnels (tresse, tissus complexes, tissage tri directionnel ou plus) (voir Fig I-7) ou linéiques (fils, mèches) (voir Fig I-8).



Fig I-6 fibres sous forme tissu[52]

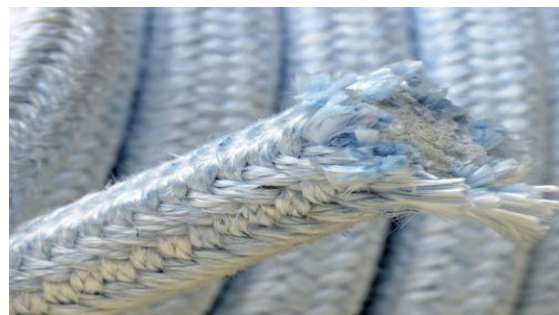


Fig I-7 fibres sous forme tresse[53]

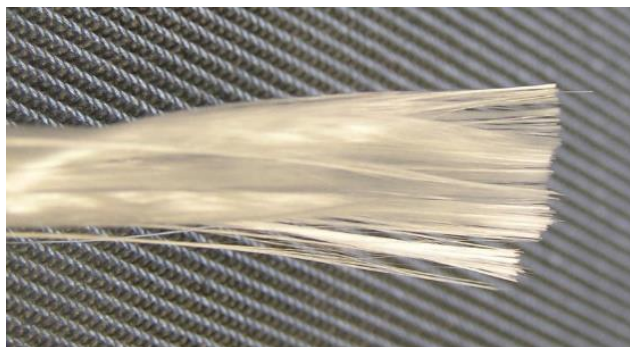


Fig I-8 fibres sous forme mèches[54]

### **I.6 Incorporation des fibres Alfa dans les matériaux composites :**

De nombreux travaux ont été menés sur les fibres Alfa, qui sont présentes en grande quantité dans la région méditerranéenne. Cette plante est cruciale pour préserver cette région de la désertification et de l'empiètement du désert.

Selon El-Abbassi et al[55], les fibres Alfa ont été analysées en termes de compositions morphologiques et chimiques, ainsi que de propriétés mécaniques. Par ailleurs, une étude comparative a été réalisée avec les fibres d'autres plantes.

Les fibres Alfa ont été utilisées comme renforts pour des matrices thermodurcissables et thermoplastiques dans plusieurs travaux de recherche universitaires. Étant donné ce qui a été mentionné précédemment, ces fibres représentent de bons candidats pour renforcer les matrices polymériques dans les pays d'Afrique du Nord[55].

La plante *Stipa Tenacissima* nécessite un sol riche en calcaire (30 à 40%) et faible en gypse (~2%) pour une croissance optimale. Toutefois, cette plante ne convient pas aux sols avec une teneur en argile de 12 à 20 %. En outre, la plante Alfa possède diverses modifications morpho-physiologiques qui lui permettent de faire face aux conditions extrêmes, notamment à l'écosystème méditerranéen difficile[55].

L'Alfa se rencontre donc dans les zones où les précipitations sont faibles et irrégulières (200 et 400 mm de pluie par an), où la température est élevée (environ 40 °C) et où l'ensoleillement est élevé.

La feuille d'Alfa est un ruban circulaire lisse, brillant et durable. Son diamètre diminue graduellement du niveau inférieur au niveau supérieur. La surface rainurée peut être dissimulée en se repliant le long de son axe long. Il est donc possible que la feuille soit ouverte ou fermée longitudinalement en fonction de l'humidité relative de l'air[55].

Les caractéristiques mécaniques du paquet d'Alfa ont fait l'objet de nombreuses recherches. La majorité de ces contributions mettent en évidence le fait que ces caractéristiques peuvent être influencées par divers facteurs tels que les conditions de croissance et de récolte, l'âge de la plante, l'emplacement des fibres, l'espèce des feuilles et des fibres. Selon ces recherches, il a été démontré que les fibres Alfa ont un module de Young, une contrainte à la rupture et une déformation à la rupture allant de [18-58 GPa], [187-1327 MPa] et [1,4-5%], respectivement[55].

La plupart des fibres naturelles présentent un faible taux de dégradation. Ainsi, il est impossible d'utiliser une température de traitement élevée sur ces fibres, car cela pourrait les détériorer[55].

Enfin, ils ont déterminé que la *Stipa Tenacissima* joue un rôle crucial dans l'équilibre des écosystèmes semi-arides et est également associée aux activités humaines à durable. Dernièrement, l'intérêt pour l'utilisation des fibres Alfa en tant que renforts dans les Composites à matrice polymérique (CMP) s'est accru.

Les caractéristiques mécaniques des fibres Alfa ressemblent à celles du jute et du sisal. Par conséquent, l'ajout des fibres Alfa a permis d'observer une amélioration de la résistance mécanique des composites polymériques. En outre, il est possible d'améliorer d'autres caractéristiques mécaniques et hydrothermiques de ces composites en utilisant des traitements chimiques sur les fibres.

Toutefois, il est important de prendre des mesures de précaution en tenant compte de l'impact néfaste de ces traitements sur l'environnement. De plus, l'intérêt économique de l'utilisation des fibres Alfa comme renforts des composites pourrait prévenir la détérioration des steppes d'Alfa.

En réalité, ces steppes ne sont pas considérées comme une priorité sociale majeure à l'heure actuelle, ce qui les transforme en zones désertiques (surpâturage et non régénération). Malheureusement, comme toutes les fibres non ligneuses, l'un des principaux inconvénients de l'utilisation des fibres Alfa dans les applications industrielles réside dans leurs propriétés chimiques et physiques très variables. Pour y remédier, il est nécessaire de créer de nouvelles méthodes agricoles et des méthodes d'extraction adaptées[55].

L'étude menée par El-Abbassi et al [55].a également examiné l'impact du traitement alcalin et du vieillissement à l'eau sur divers composites en polypropylène renforcé par des fibres short Alfa. Dans cette optique, divers composites composés de fibres non traitées et

traitées ont été créés en utilisant des techniques d'extrusion et de moulage par injection. Ensuite, les produits obtenus ont été soumis à un processus de vieillissement à l'azote. Les résultats indiquent que le traitement alcalin est effectivement responsable de la diminution de l'absorption d'eau dans les composites étudiés lorsqu'ils sont exposés à l'humidité. De plus, cette méthode permet une amélioration significative des caractéristiques de traction par rapport aux matériaux non traités.

Effectivement, l'utilisation de ce traitement chimique simple et abordable a entraîné une amélioration du module de Young et de la résistance à la traction d'environ 23 et 16%, respectivement, pour le composite avec 30% de poids par rapport au composite normal. Selon l'étude des émissions acoustiques, il a été constaté que le nombre de signaux provenant du décollement de la fibre/matrice augmente avec la fibre traitée et diminue avec le vieillissement à l'eau. Il est confirmé par ces observations que le traitement alcalin entraîne une forte connexion interfaciale entre la fibre et la matrice, tandis que le processus d'élongation à l'eau entraîne des dommages considérables à l'interface fibre/matrice. Par ailleurs, la détérioration à l'eau après vieillissement due à l'absorption d'humidité semble être moins importante pour les matériaux traités que pour ceux non traités[56].

### **I.7 Incorporation des fibres de Diss dans les matériaux composites :**

Aujourd'hui, on considère les fibres naturelles issues du secteur forestier ou agricole comme une alternative intéressante aux fibres traditionnelles (amiante, verre, carbone et aramide). Dans cette optique, les chercheurs font des efforts considérables pour créer des matériaux composites à base de fibres naturelles. Le Diss est l'une des fibres utilisées.

Selon Sellami et al [57] une autre étude a examiné l'impact de divers traitements appliqués aux fibres d'*Ampélodesmos Mauritanicus* (Diss) sur leur capacité à absorber de l'eau. Afin d'accomplir cela, quatre méthodes de traitement ont été utilisées : le traitement thermique par ébullition des fibres avec lavage à l'eau, le traitement par ébullition des fibres sans lavage, le traitement par séchage des fibres à 50°C sans ébullition et le traitement avec de l'huile de lin[58].

Selon les résultats, le traitement des fibres par ébullition ou séchage n'a aucun impact sur la réduction de leur capacité d'absorption d'eau, car elles ont atteint 100% d'absorption après 60 minutes d'immersion dans l'eau. En revanche, l'utilisation de l'huile de lin pour traiter les fibres

a considérablement diminué le coefficient d'absorption des fibres, ce qui confirme, selon l'auteur, la capacité de la fibre traitée à l'huile à s'étancher[58].

Finalement, Luzi et al [59] ont réalisé une étude sur la valorisation du Diss. On considère ces fibres comme des matériaux botaniques qui favorisent l'extraction de nano-cristaux de cellulose (NCC).

Les NCC ont été extraits des tiges d'Amplodesmos Mauritanicus en utilisant deux étapes de prétraitement différentes. La procédure d'hydrolyse acide suivante a permis d'obtenir des NCC en suspension aqueuse. Les deux traitements préliminaires, principalement basés sur des traitements chimiques ou enzymatiques, ont été examinés en détail et leurs caractéristiques ont été comparées.

La caractérisation de la matière première, des tiges de Diss traitées chimiquement ou enzymatiquement, des NCC extraits de la cellulose prétraitée chimiquement et enzymatiquement a été envisagée en utilisant la microscopie électronique à balayage à émission de champ, l'analyse thermogravimétrique, la spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier et la diffraction des rayons X.

Les résultats de l'analyse morphologique des fibres traitées ont démontré que les deux traitements ont permis de diminuer le diamètre des fibres et que, en complément du traitement acide, ils ont permis d'extraire les NCC à une échelle nanométrique. Les mesures de diffraction par rayons X ont révélé la présence de pics supplémentaires bien définis dans le cas des NCC extraits de fibres traitées enzymatiquement, par rapport aux NCC extraits de fibres traitées chimiquement.

Cela est dû à la formation de nouveaux domaines cristallins lors de la dégradation enzymatique de la cellulose I. Les NCC C sont plus petits que les NCC E, notamment les NCC C ont présenté des valeurs moyennes de diamètre et de longueur plus faibles que les NCC E. Les résultats montrent que le Diss, une matière première attrayante qui peut être cultivée sur des terres moins fertiles ou marginales, nécessitant une gestion modeste des parasites et des maladies, peut être utilisé dans différents secteurs où des produits à haute valeur ajoutée sont recherchés [59].

### **I.8 Incorporation des fibres de Luffa dans les matériaux composites :**

L'incorporation des fibres de Luffa dans les matériaux composites est une voie prometteuse pour développer des matériaux innovants, durables et respectueux de

l'environnement. Les fibres de Luffa, issues d'une plante végétale, sont biodégradables, recyclables et ont un faible impact environnemental[60]. Lorsqu'elles sont incorporées dans une matrice cimentaire ou de résine polyester, les fibres de Luffa apportent de bonnes propriétés mécaniques en compression et en flexion[60]. Le traitement chimique des fibres de Luffa, par exemple avec de la NaOH, améliore leur adhésion avec la matrice et donc les propriétés finales du composite. Des recherches ont montré que l'ajout de fibres de Luffa dans un composite à base de polyéthylène peut augmenter le module de flexion et la résistance à la traction[60].

De plus, les fibres de Luffa possèdent une bonne propriété d'absorption, ce qui les rend utiles pour absorber des métaux lourds ou des colorants organiques. Cependant, une mauvaise dispersion des fibres dans le matériau peut conduire à la formation de défauts et réduire les propriétés mécaniques du composite[60].

En conclusion, l'intégration des fibres de Luffa dans les matériaux composites offre des opportunités prometteuses pour le développement de matériaux plus durables et économiques. Bien que certains défis techniques subsistent, les avancées en recherche et développement continuent de rendre ces composites de plus en plus viables pour diverses applications. La combinaison de performance, d'économie et de durabilité environnementale positionne les composites renforcés de fibres de Luffa comme des matériaux de choix pour l'avenir.

### **I.9 Incorporation des fibres de Jute dans les matériaux composites :**

Les fibres de jute sont de plus en plus utilisées comme renfort dans les matériaux composites, en remplacement partiel ou total des fibres synthétiques comme le verre ou le carbone[60]. Le jute offre de nombreux bénéfices : il s'agit d'une fibre naturelle, biodégradable, recyclable et écologique. De plus, elle est environ 50% moins chère que d'autres fibres naturelles comme le lin. Les fibres de jute, intégrées dans une matrice cimentaire ou de résine polyester, offrent des propriétés mécaniques remarquables en compression et en flexion[61]. Elles permettent aussi d'améliorer l'isolation thermique grâce à la porosité qu'elles induisent. Cependant, une comparaison avec les tubes en fibre de verre montre que ces derniers restent plus performants mécaniquement. Des recherches sont en cours pour optimiser l'utilisation des fibres de jute, notamment en les combinant avec du graphène pour créer des composites encore plus performants et écologiques.

En résumé, la présence des fibres de jute dans les matériaux composites marque une avancée majeure vers des solutions plus durables et efficaces. Malgré les difficultés

techniques, les recherches et développement continus permettent d'améliorer en permanence les caractéristiques et la résistance de ces matériaux. Les matériaux composites renforcés de fibres de jute sont considérés comme des matériaux de choix pour répondre aux besoins futurs de différents secteurs industriels en raison de leurs avantages mécaniques, économiques et environnementaux[61].

### **I.10 Structure d'un matériau composite :**

Les structures des matériaux composites peuvent être classées en trois types.

- ❖ Les monocouches
- ❖ Les stratifiées
- ❖ Les sandwiches

### **I.11 Caractéristiques générales d'un composite :**

- ❖ 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. Les propriétés des matériaux composites résultent en
- ❖ Des propriétés de la nature et de la quantité des matériaux constituants.
- ❖ De la géométrie et de la distribution du renfort.
- ❖ De leurs interactions, de la nature de l'interface matrice - renfort, etc.

### **I.12 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.

# *CHAPITRE II*

## *Composites*

### *À Fibres Naturelles*

## **II.1 Introduction :**

Les matériaux peuvent être classés en familles : métaux, polymères, céramiques et composites. Effectivement, les matériaux composites sont anciens, ils ont été découverts par l'homme depuis longtemps, mais leur utilisation connaît une croissance rapide. En alliance avec une légèreté et une résistance mécanique remarquables, ces matériaux offrent en effet de nombreuses applications dans des secteurs aussi importants que l'aéronautique, la construction, le génie civil, l'équipement sportif ou le domaine biomédical[62].

Les composites continuent de progresser vers des produits qui sont soit les plus abordables, soit les plus efficaces, ou les deux à la fois. En outre, afin de préserver l'environnement et la santé publique, les composites ont tendance à adopter une approche respectueuse de l'environnement. Afin de diminuer les coûts des fibres traditionnelles (carbone, verre et aramide), de nouvelles substances ont été créées. Des études se sont concentrées sur les composites renforcés par des fibres naturelles. Ces composites allient de bonnes caractéristiques mécaniques à une densité réduite. Ce genre de composés présente plusieurs bénéfices bien connus tels que le prix, la disponibilité des ressources naturelles renouvelables, la biodégradabilité, et bien d'autres encore...[63]

## **II.2 Composites à fibres naturelles :**

Les matériaux composites bio sont constitués d'une ou plusieurs phases provenant d'une source biologique. En ce qui concerne le renforcement, il est possible d'inclure des fibres naturelles comme le DISS, Luffa, l'Alfa, le Jute, etc. Il est également possible que les matrices soient constituées de polymères, principalement provenant de ressources renouvelables comme des huiles végétales ou des amidons. L'avantage de ces composites réside dans leur respect de l'environnement et leur capacité à se dégrader en partie. Les expressions "renouvelable", "recyclable" et "durable" sont de plus en plus courantes. À la fin du cycle, ils peuvent être réutilisés ou compostés sans avoir de conséquences néfastes sur l'environnement.[64]

Récemment, les fibres naturelles ont suscité un vif intérêt dans le domaine industriel. Ces fibres sont solides, ont des densités assez faibles, sont abordables et sont issues de ressources abondantes, renouvelables et non polluantes. Il est possible d'associer ces fibres à des matrices de diverses natures. Les composites fabriqués à partir de fibres naturelles possèdent des caractéristiques mécaniques qui peuvent être exploitées dans les secteurs techniques. Effectivement, on observe une augmentation de l'utilisation industrielle de ces matériaux

composites dans de multiples domaines d'activité (automobile, bâtiment, sport...). Il est indéniable que ce succès est attribuable aux caractéristiques intrinsèques des renforts naturels et à leur engagement écologique. Malheureusement, ces fibres peuvent être utilisées de manière restreinte dans des applications industrielles en raison de quelques désavantages bien connus tels que leur capacité à absorber de l'eau et leur faible stabilité thermique.[63]

### **II.3 Fibres Naturelles :**

Les FN font l'objet d'une véritable effervescence, que ce soit dans le domaine académique ou industriel. Ce dernier a été amplifié par la demande de produits plus respectueux de la nature et de l'environnement. Il est également observé que les fibres naturelles attirent en raison de leurs coûts bas (coûts de production et d'exploitation), ce qui les positionne comme une alternative aux fibres synthétiques, qui sont plus onéreuses et plus néfastes sur le plan environnemental.

Ces FN offrent de multiples bénéfices en raison de leur capacité à se dégrader biologiquement et de leur faible poids. D'autre part, ces fibres ont des caractéristiques non homogènes en fonction de leur origine (diamètre variable de la fibre, longueur variable), ce qui entraîne généralement une dispersion de leurs propriétés mécaniques.[65]

À l'heure actuelle, le lin, le chanvre, la paille de jute, le bois, la canne (à sucre et bambou), le kénaf, la fibre de banane, la fibre de feuille d'ananas et le papyrus sont des fibres naturelles étudiées pour être utilisées dans les plastiques.[66]

Le bois d'arbre est largement le matériau le plus répandu à l'échelle mondiale, avec une production annuelle mondiale de  $1,75 \times 10^9$  tonnes par an, provenant de plus de 10 000 espèces différentes. Par exemple, la production annuelle du coton est de  $18,5 \times 10^6$  tonnes, tandis que celle du kénaf, du lin et du chanvre est de  $9,7 \times 10^5$ ,  $8,3 \times 10^5$  et  $2,1 \times 10^5$  tonnes respectivement.[67]

#### **II.3.1. Classification des fibres naturelles :**

Plusieurs végétaux produisent des fibres naturelles. Traditionnellement, elles sont appréciées dans divers secteurs tels que le textile ou les cordes. Toutes elles sont en partie composées de cellulose, d'où le terme de fibres cellulosiques, et sont extraites de diverses parties des plantes[68]. Il existe plusieurs critères de différenciation des fibres :

- Les fibres naturelles peuvent être divisées en fibres de tiges (kénaf, jute, lin, ramie), de feuilles (sisal, abaca, paille de graminée), pseudo-troncs (palmier) et

enveloppes de fruits (noix de coco) ou en fibres dures retirées des tiges de plantes (bambou, Alfa).

- En fonction de la quantité d'holocellulose (cellulose et hémicellulose) et de lignine, on peut identifier les fibres ligneuses (dures et rigides issues de matériels ligneux tels que le bois d'œuvre, les résidus de l'industrie du bois) et les fibres non ligneuses (douces, souples, issues de végétaux non ligneux souvent annuels relativement moins riches en lignine tels que le kénaf, le chanvre, le sisal, le jute et le lin).
- Les fibres naturelles peuvent être classées en deux catégories en fonction de leur longueur : les fibres longues, appelées fibres libériennes, sont issues des tiges et de l'écorce des tiges de plantes annuelles. Les fibres longues provenant des feuilles ou des troncs d'arbre sont plus dures et plus rigides en raison de leur teneur en lignine, tandis que les fibres courtes ou étoupes sont plus dures et plus rigides.[45]

### **II.3.2. Composition des fibres naturelle :**

Les matériaux de construction sont aujourd'hui fabriqués à partir de fibres naturelles et artificielles. Les fibres artificielles sont conçues de façon précise en utilisant différents éléments avec des proportions préétablies, ce qui les rend identiques à travers le monde. Ainsi, leurs caractéristiques mécaniques et thermiques ne diffèrent guère. En revanche, les fibres naturelles présentent des caractéristiques particulières, car elles se développent dans un milieu naturel grâce à l'apport du sol, de la lumière du soleil, de l'eau et de l'air.

Les conditions naturelles de l'environnement ne sont pas identiques à l'échelle mondiale, mais diffèrent d'un lieu à l'autre et d'une saison à l'autre, ces différences ont un impact sur le développement des plantes. Ainsi, leurs caractéristiques mécaniques et thermiques diffèrent selon leur localisation géographique. C'est la raison pour laquelle il est essentiel de mener des études approfondies afin d'étudier les caractéristiques des fibres naturelles [8] Tableau II-1

#### **a) Les hémicelluloses**

Les hémicelluloses sont des polysaccharides qui sont reliés les uns aux autres par des chaînes relativement courtes et polyvalentes. Les microfibrilles de cellulose sont étroitement liées à elles, englobant la cellulose dans une matrice. Les hémicelluloses sont naturellement très hydrophiles. Les hémicelluloses ont un poids moléculaire plus faible que la cellulose [69].

**b) La cellulose**

La cellulose joue un rôle essentiel dans la structure de toutes les fibres naturelles. Il s'agit d'un matériau naturel. Les molécules de cellulose se composent d'unités de glucose qui sont liées entre elles en longues chaînes, qui sont à leur tour liées entre elles en faisceaux appelés microfibrilles.

La cristallinité de la cellulose est influencée par la présence de la liaison hydrogène, qui influence les caractéristiques physiques des fibres naturelles. Il s'agit du principal élément qui leur donne la résistance, la rigidité et la stabilité.[69]

**c) Cire**

Les cires végétales sont principalement composées de mélanges de longues chaînes altérées d'hydrocarbures aliphatiques. Les alcalins, les acides gras, les alcools primaires et secondaires, les cétones, les aldéhydes et d'autres composés sont présents dans elles [69].

**d) Lignine**

Il s'agit d'un polymère complexe d'hydrocarbures aromatiques qui apporte de la solidité aux plantes. Il est impossible pour les plantes d'atteindre de grandes hauteurs sans lignine. La lignine se distingue par sa structure amorphe et son poids moléculaire élevé, ce qui la rend moins polaire que la cellulose. Elle agit comme une substance chimique qui adhère à l'intérieur des fibres et entre elles [69].

**e) Pectine**

Il s'agit d'un terme qui fait référence aux hétéropolysaccharides qui donnent de la souplesse aux plantes. Les fibres libériennes et les fruits contiennent de la pectine. Elle est dégradée, ce qui diminue sa résistance [69].

Tableau II-1 Composition des fibres naturelles

<b>Fibres</b>	<b>Cellulose (%m)</b>	<b>Hemicellulose (%m)</b>	<b>Lignine (%m)</b>	<b>Pectine (%m)</b>	<b>Cires (%m)</b>	<b>Réf</b>
<b>Abaca</b>	62,5	21	12	0,8	3	[69]
	56-63	--	12-13	1	--	[66]
<b>Alfa</b>	45,4	38,5	14,9	--	2	[69]
	43,8	28,4	18,7	--	--	[55]
	45	25	23	--	5	[55]
<b>Bambou</b>	34,5	20,5	26	--	--	[69]
<b>Chanvre</b>	81	20	4	0,9	0,8	[69]
	70-74	17,9-22,4	3,7-5,7	0,9	0,8	[66]
<b>Coton</b>	89	4	0,75	6	0,6	[69]
	85-90	5,7	--	7,85-8,5	0,6	[66]
<b>Coco</b>	46	0,3	45	4	--	[69]
	32-43	0,15-0,25	40-45	8	--	[66]
<b>Diss</b>	30,33	11,6	17	3,55	--	[69]
<b>Jute</b>	67	16	9	0,2	0,5	[69]
	61,1-71,5	13,6-20,4	12-13	0,2	0,5	[66]
<b>Kenaf</b>	53,5	21	17	2	--	[69]
	45-57	21,5	8-13	3-5	--	[66]
<b>Lin</b>	70,5	16,5	2,5	0,9	--	[69]
	71	18,6-20,6	2,2	2,3	1,7	[66]
<b>Ramie</b>	72	14	0,8	1,95	--	[69]
	68,8-76,2	13,1-16,7	0,6-0,7	1,9	0,3	[66]
<b>Sisal</b>	60	11,5	8	1,2	--	[69]
	66-78	10-14	10-14	10	2	[66]

### II.3.3. Structure de la fibre naturelle :

L'architecture et la composition biochimique de la paroi de la fibre naturelle sont à l'origine de sa structure. Elle est constituée de trois couches superposées dans le sens radial et parallèles à l'axe de la fibre. Cette structure extrêmement complexe est en réalité constituée du canal central appelé lumen et de la paroi cellulaire. Elle se compose de trois parties distinctes : lamelle centrale, paroi primaire et paroi secondaire[70] (voir Fig II-1).

La paroi primaire, avec un diamètre de 0.1 à 0.2  $\mu\text{m}$ , est la plus fine, composée de cellulose désordonnée dans la pectine, l'hémicellulose et la matrice de lignine, tandis que la lamelle centrale a une épaisseur de 0.05 à 0.2  $\mu\text{m}$ . Elle garantit la connexion entre les cellules pour créer le faisceau fibrillaire et donne à la fibre ses caractéristiques de rigidité, tandis que le lumen est chargé de transporter l'eau. Trois parties de la paroi secondaire sont distinctes : la première est située à l'extérieur ; la paroi secondaire (S1) est mince et ne représente que 10 à 20 % de la paroi totale. La paroi centrale (S2) est la partie la plus importante de la paroi cellulaire, représentant 70 à 90 % de la paroi fibrillaire. Enfin, la paroi interne (S3) est la couche la plus mince, représentant 2 à 8% de la paroi totale. Ainsi, la paroi cellulaire de la fibre est influencée par la couche (S2) de la paroi secondaire[71, 72].

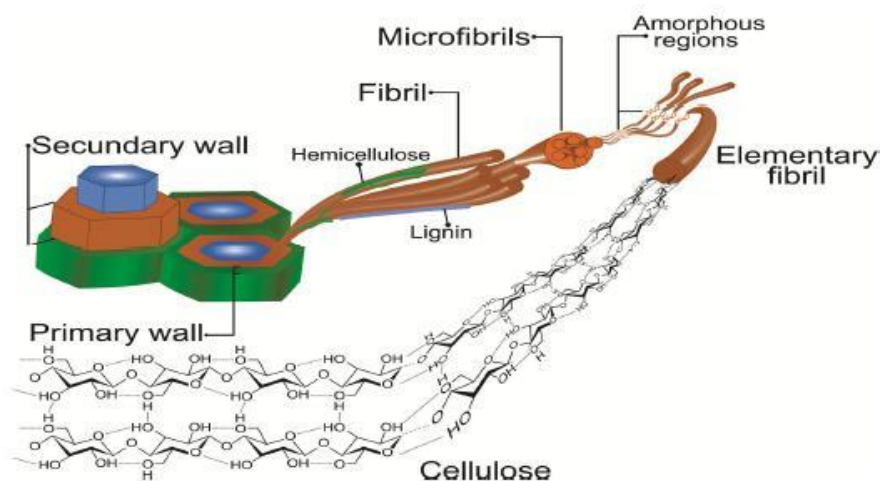


Fig II-1 Structure des fibres naturelles[71].

Les parois des fibres sont fortement influencées par l'orientation des microfibrilles par rapport à l'axe de la cellule. Lorsque l'angle des microfibrilles augmente, le module de Young diminue car les microfibrilles de cellulose sont plus sollicitées en fonction de leur axe, tandis que l'extensibilité des parois augmente [45, 71].

A l'échelle microscopique, l'architecture de ces fibres est complexe. Elles sont en fait constituées par des microfibrilles, elles-mêmes formées par des chaînes de cellulose. Ces chaînes s'associent entre elles par des liaisons hydrogène de façon parallèle pour former des microfibrilles dont la section (de l'ordre de quelques nm) est variable selon les espèces végétales. L'enchaînement des unités constitutives de cellulose induit une rigidité des chaînes qui, alliée à la grande régularité des enchaînements et au développement des liaisons hydrogènes inter et intra-chaîne est particulièrement favorable à une cristallinité élevée. La formation de zones cristallines très cohésives est responsable de l'essentiel des propriétés physiques et chimiques de ce matériau[71].

#### II.3.4. Caractéristiques et propriétés des fibres naturelles :

L'interaction entre la cellulose, les hémicelluloses, la lignine et la cire influence les propriétés globales des plantes à fibres. La qualité mécanique principale des fibres naturelles, qui les rend aptes à la fabrication de matériaux composites, est leur résistance à la traction. La densité, le module de Young, l'allongement et la rigidité sont d'autres caractéristiques. Il est essentiel de prendre en compte des considérations essentielles lorsqu'on choisit une fibre spécifique à utiliser dans un matériau composite ou dans toute autre application industrielle. Les fibres naturelles présentent des caractéristiques exceptionnelles en matière d'isolation thermique, sonore et électrique [69].

Tableau II-2 Caractéristiques mécaniques des fibres naturelles

Fibres	Densité(g/cm <sup>3</sup> )	Allongement(%)	Résistance a la traction (Mpa)	Module de Young (Gpa)	Réf
<b>Abaca</b>	1,5	3,4	12	41	[69]
<b>Alfa</b>	0,89	5,8	350	22	[69]
<b>Bambou</b>	1,5		575	27	[69]
<b>Chanvre</b>	1,45	3	530	45	[69]
	--	1,6	690	--	[66]
<b>Coco</b>	1,25	27,5	140,5	6	[69]
	1,2	30	175	4,0-6,0	[66]
<b>Coton</b>	1,55	7	500	8	[69]
	1,5-1,6	7,0-8,0	287-597	5,5-12,6	[66]
<b>Diss</b>	1,3	12,42-18,41	122-316,8	3,5	[73]

<b>Doum</b>	--	2,54 ± 0,44	249,7 ± 8,95	6,34 ± 1,44	[74]
<b>Jute</b>	1,4	2,5	325	37,5	[69]
	1,3	1,5-1,8	393-773	26,5	[66]
<b>Kéna</b>	1.31	--	743	41	[69]
<b>Lin</b>	1,45	2,3	700	60	[69]
	1,5	2,7-3,2	345-1035	27,6	[66]
<b>Ramie</b>	1,55	3,7	915	23	[69]
	--	3,6-3,8	400-938	61,4-128	[66]
<b>Sisal</b>	1,4	8	460	15,5	[69]
	1,5	2,0-2,5	511-635	9,4-22	[66]

### II.3.5. Avantages et inconvénients :

Les chercheurs se sont récemment penchés sur les fibres naturelles en tant que renfort, car elles présentent des avantages par rapport à d'autres matériaux bien connus. Elles respectent l'environnement, sont complètement biodégradables, sont abondantes, renouvelables, abordables et ont une faible densité. Les fibres de verre, de carbone et d'aramide sont plus légères que les fibres naturelles. La biodégradabilité des fibres naturelles peut contribuer à un écosystème sain, tandis que leur faible coût et leurs performances élevées répondent à l'intérêt économique de l'industrie [66].

À la fin de leur cycle de vie, lorsque les plastiques renforcés par des fibres naturelles sont soumis à une combustion ou à une mise en décharge, la quantité de CO<sub>2</sub> libérée par les fibres est égale à la quantité assimilée pendant leur croissance. La nature abrasive de la fibre est beaucoup plus faible, ce qui entraîne des avantages en matière de procédés techniques et de recyclage des matériaux composites en général. Les matériaux les plus respectueux de l'environnement sont les plastiques renforcés par des fibres naturelles, qui sont utilisés comme matrices des polymères biodégradables, et qui peuvent être réutilisés à la fin de leur cycle de vie. Le verre est souvent substitué par des composites à base de fibres naturelles, principalement dans des applications non structurales.

Plusieurs éléments automobiles qui étaient autrefois composés de composites en fibres de verre sont désormais conçus avec des composites écologiques. Malgré l'aspect écologique et renouvelable des fibres naturelles et de leurs composites (à la différence des sources d'énergie traditionnelles, à savoir le charbon, le pétrole et le gaz), ils comportent

plusieurs désavantages. Ces caractéristiques incluent une mouillabilité limitée, une incompatibilité avec certaines matrices polymériques et une absorption d'humidité élevée. Les propriétés mécaniques des matériaux composites à base de fibres naturelles non modifiées sont souvent insatisfaisantes. Dans de nombreux cas, il est nécessaire d'utiliser un traitement de surface ou des agents de compatibilisations avant de procéder à la fabrication du composite. Des traitements physiques (traitement au plasma froid, traitement corona) et/ou chimiques (organosilanes d'anhydride maléique, isocyanates, permanganate d'hydroxyde de sodium et peroxyde) peuvent améliorer les propriétés. Les fibres naturelles présentent des propriétés mécaniques bien inférieures à celles des fibres synthétiques, mais leurs caractéristiques spécifiques, telles que la rigidité, peuvent être comparables à celles des fibres synthétiques[66].

### **II.3.6. Application des fibres naturelles :**

Les fibres naturelles sont utilisées en remplacement des fibres synthétiques dans différentes matrices. Les composites ainsi fabriqués peuvent être utilisés de manière efficace en tant que remplacement du bois et dans différents autres secteurs techniques, tels que les pièces automobiles.

Au cours des soixante-dix dernières années, la quasi-totalité des matériaux utilisés pour la fabrication de produits de base et de nombreux produits techniques provenaient de textiles naturels. Les fibres naturelles locales, telles que le lin et le chanvre, étaient utilisées pour la fabrication des textiles, des cordes, des toiles et du papier. Certains d'entre eux sont toujours employés de nos jours.

Les premières feuilles, tubes et tuyaux à usage électronique ont été fabriqués à partir de matériaux composites dès 1908 (papier ou coton pour renforcer les feuilles, résines phénoliques ou mélamine-formaldéhyde).

En 1996, par exemple, les sièges d'avion et les réservoirs de carburant étaient conçus à partir de fibres naturelles avec une faible quantité de liants polymères. Au cours des dix dernières années, les composites de fibres naturelles ont été utilisés dans de nombreuses applications en raison de leurs propriétés remarquables, comme la biodégradabilité et des propriétés spécifiques élevées.

Aujourd'hui, l'utilisation des fibres naturelles, en tant que renforts dans l'application technique, est en plein essor, notamment dans les secteurs de l'automobile et de l'emballage (boîtes à œufs par exemple). Depuis de nombreuses années, les déchets textiles sont

employés dans l'industrie automobile afin de renforcer les plastiques employés dans les véhicules, en particulier dans les Trabant[66].

Les fibres naturelles sont largement utilisées dans les applications composites à travers le monde. Ainsi, les matériaux composites contenant des fibres naturelles sont employés. Pour la production de divers éléments dans le domaine de l'automobile.

Ils sont principalement constitués de matrices de polypropylène ou de polyester, avec des fibres comme le lin, le chanvre et le jute. Par conséquent, dans le futur, les voitures pourront être fabriquées à partir d'huile de noix de cajou et de chanvre. Les fibres de jute peuvent même être utilisées pour fabriquer des clubs de golf, tandis que les raquettes de tennis peuvent être renforcées avec des poils de noix de coco. Les supports de vélos peuvent tirer leur puissance de l'une des 2000 autres plantes adaptées. En utilisant des fibres naturelles, la révolution technologique pourrait conduire à la substitution des matériaux synthétiques[75].

La variété de produits fabriqués actuellement à partir de fibres naturelles et de résines biologiques provenant du soja ouvre la voie à une nouvelle génération de composites biologiques pour diverses applications. Elles incluent non seulement les voitures (y compris les camions), mais également les habitations et les structures qui sont résistantes aux ouragans, en particulier aux États-Unis. Les autres secteurs où ces nouveaux matériaux trouvent un marché sont le secteur de la construction et l'industrie des loisirs. En Allemagne, les fabricants de voitures ont pour objectif de rendre chaque élément de leurs véhicules recyclable ou biodégradable[66].

Finalement, les bio composites fabriqués à partir de fibres naturelles forment une nouvelle catégorie de matériaux intelligents. On les a principalement employés pour l'impression 3D, soit sous forme de fibres discontinues, soit sous forme de polymère renforcé en poudre. Il est courant que les bio composites imprimés en 3D présentent une faible quantité de fibres (< 30 % en poids) et un rapport d'aspect très bas (L/d). Cela permet de diminuer la viscosité globale et d'améliorer leur imprimabilité[76].

Il est prévu que les tendances futures en matière d'impression 3D soient associées à des caractéristiques mécaniques plus avancées et à une sélection plus approfondie des matériaux. De cette manière, les biocomposites à fibres naturelles continues constituent une option pertinente aux biocomposites discontinus, en offrant des performances mécaniques considérablement améliorées grâce à une plus grande quantité de fibres et un contrôle plus

efficace de l'anisotropie grâce à l'orientation des fibres. Dans cette optique, il est nécessaire de proposer sur le marché des fils de fibres naturelles de haute qualité (en ce qui concerne la diversité des fibres, la faible torsion et le faible poids linéaire), et il est nécessaire d'étudier la production de filaments à forte teneur en fibres. Il est crucial d'améliorer les bureaux d'imprimantes en utilisant un environnement contrôlé, ainsi qu'une alimentation et une buse personnalisées, afin de tirer pleinement parti du potentiel des fibres naturelles (comme la sensibilité à l'humidité, la topologie de la surface, les propriétés de traction). Il est impossible d'utiliser d'autres matériaux que ceux qu'elles ont fournis pour imprimer des composites à fibres continues avec les machines actuelles (par exemple, les imprimantes Markforged). À l'avenir proche, une analyse approfondie de l'impact des paramètres d'impression et de tranchage sur les caractéristiques et les limites géométriques est prévue pour permettre la création de modèles prédictifs fiables[76] (voir Fig II-2).



Fig II-2 Applications des CFN : (a) Automobile, (b) Cyclisme, (c) Casque de protection, (d) Instruments de musique, (e) Chaise, (f) Planche de surf[77].

### II.3.7. Le potentiel des fibres naturelles en Algérie :

On retrouve une grande quantité de fibres naturelles dans les régions à climat tempéré ou semi-aride. Ce climat est favorable à cette végétation en Algérie, que ce soit dans les hauts plateaux ou dans le nord, où le climat est méditerranéen. En général, ces fibres sauvages ne requièrent pas de grandes précautions et sont naturellement résistantes aux conditions extrêmes, ce qui nécessite une récolte importante sans avoir besoin de grandes ressources (voir Fig II-3).

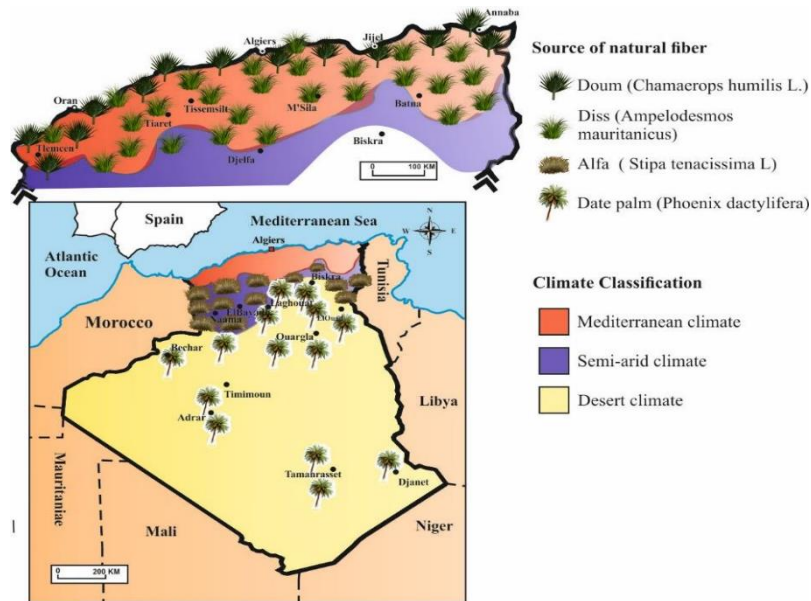


Fig II-3 Carte de la distribution des plantes, source de fibre naturelles en Algérie[78].

Par la suite, il est connu que ces fibres naturelles sont employées de façon traditionnelle (voir Fig II-4).



Fig II-4 Exemples d'artisanat Alfatière (des paniers, des espadrilles)[78].

Cependant, ces fibres sont principalement localisées en milieu rural, ce qui peut entraîner la création d'une microéconomie grâce à la création de petites entreprises pour bénéficier de cette proximité avec les matières premières. Ces sociétés auront la possibilité de prendre en compte différentes utilisations des fibres, telles que la papeterie, la fabrication de produits artisanaux à moyenne ou grande échelle, ou même l'exploration des composites à renforts naturels.

### II.3.8. Les fibres Alfa :

L'Alfa (*Stipa Tenacissima*) est une herbe à touffes originaire de la Méditerranée occidentale, qui se développe sur les terres semi-arides de l'Afrique du Nord et du sud de l'Espagne[4, 79].

Ses tiges sont cylindriques et atteignent une hauteur maximale d'environ 1 m. Le cycle végétatif est étroitement lié à la différenciation des fibres. À la base de la feuille, les fibres sont courtes et larges, puis elles deviennent plus longues et plus fines au-dessus.

La tige de l'Alfa semble avoir une préférence pour les sols calcaires, peu profonds et perméables, dont la texture est dominée par une forte concentration de poussière de sable. Cette plante possède les caractéristiques nécessaires pour la fabrication du papier, à savoir la souplesse, la douceur et la résistance mécanique de la cellulose.

Selon les dernières données, l'Alfa s'étend sur une superficie d'environ 3 millions d'hectares en Algérie[79] (voir Fig II-5).

Les fibres cellulosiques solides, rigides et légères de la tige d'Alfa sont principalement employées dans la fabrication de papiers de grande qualité, ainsi que dans la décoration, les cigarettes et les applications diélectriques. La tige est également couramment employée dans la production de cordes et de tapis[79].



Fig II-5 La plante d'alfa (M'sila-El Hamel).

Les papiers d'impression sont généralement fabriqués à partir de la pâte d'herbe d'Alfa, mélangée à une petite quantité de pâte chimique de bois. En raison de la petite longueur des fibres, le papier a une résistance à la traction plus faible que de nombreux

autres papiers, mais il a une résistance plus forte au rétrécissement et à l'étirement. Ce papier est rempli de manière dense, avec des qualités d'encrage exceptionnelles[4].

### II.3.9. Les fibres de DISS :

*Ampelodesmos mauritanicus* est une plante herbacée de grande taille originaire d'Afrique du Nord et d'Europe du Sud, ainsi que des régions sèches de Grèce et d'Espagne, appelée DISS en arabe. Il s'agit d'une plante sauvage qui se développe naturellement, avec une composition chimique composée de 44-46% de cellulose, 26-27% d'hémicelluloses, 17-25 % de lignine et 1,3 % de graisses et de cires. La teneur en minéraux varie ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  et  $\text{K}_2\text{O}$ ) (8-10%) en fonction des conditions de développement de la plante, de la composition du sol et des conditions climatiques de croissance.

La plante Diss a démontré des caractéristiques mécaniques et thermiques intéressantes, ce qui a encouragé son utilisation pour la fabrication de matériaux de construction traditionnels en Afrique du Nord ainsi que de paniers artisanaux.



Fig II-6 La plante de Dis.[78]

Les propriétés antiparasitaires de ces fibres ont également été exploitées et étudiées de manière approfondie, ce qui en fait une utilisation traditionnelle de cette plante. Au fil des années, elle a fait l'objet d'études en tant que potentielle source de biomasse pour la production de bioénergie[59] (voir Fig II-6).

### II.3.10. Les fibres de Luffa :

Luffa cylindrica, également connue sous le nom de Loofah en arabe, est une espèce d'éponge végétale de la famille des Cucurbitacées. Elle comprend environ sept espèces. Il s'agit d'une plante polyvalente présente dans les régions tropicales, subtropicales et dans le bassin méditerranéen.

Des secteurs tels que le lavage et le frottement des ustensiles, dans le bain, ainsi que l'artisanat tels que la fabrication de chapeaux et de tapis, Les grains de Luffa sont plantés en avril-mai et récoltés en octobre respectivement. Elle peut atteindre une longueur de (60 à 70) cm et un diamètre de 5 à 15 cm (voir Fig II-7).

Afin d'obtenir la célèbre éponge de Luffa, nous suivons les étapes :

- Une fois que la courge éponge est récoltée, on la laisse sécher pendant un temps.
- Enlèvement du bout à l'extrémité de la fleur.
- Secoué afin de déposer les graines afin de les replanter.
- Ajouter de l'eau à la Luffa sèche pendant une heure.
- Peu de temps après l'éplucher, nous aurons la célèbre éponge.



Fig II-7 plante de luffa.[80]

### II.3.11. Les fibres de Jute :

Le jute est un arbre buissonnant originaire du Sud-Est asiatique. Le Bangladesh et l'Inde sont les principaux fournisseurs. On utilise les déchets de culture et de filature dans le secteur de la papeterie. Les fibres mesurent en moyenne 2 mm de longueur et 20  $\mu\text{m}$  de largeur.



Fig II-8 Les fibres de Jute

## II.4 Procédés de mise en œuvre des matériaux composites :

Les scientifiques et les ingénieurs sont de plus en plus attirés par les matériaux composites en raison de leurs capacités de transformation et de la flexibilité de conception qu'ils proposent. L'analyse des phénomènes qui régulent la combinaison des renforts et de la matrice a engendré de multiples méthodes et méthodes de mise en pratique. Il y a généralement deux types de contraintes qui influencent ces derniers : des contraintes financières liées au nombre de pièces à fabriquer et des contraintes techniques qui peuvent varier en fonction des caractéristiques mécaniques, de l'aspect de surface, de la finition, etc.

En général, les méthodes de fabrication des composites à fibres naturelles sont similaires à celles employées pour les matériaux composites. Différentes méthodes sont utilisées pour mélanger les fibres naturelles avec des matrices thermoplastiques ou thermodurcissables : moulage par injection, par infusion, extrusion, etc.

### II.4.1 Moulage au contact :

Réalisation de pièces à partir de résines thermodurcissables, à température ambiante et sans pression, selon un procédé manuel. Dans cette méthode, les fibres sèches sont placées à la surface d'un moule, puis les couches successives de fibres sont

ajoutées jusqu'à ce qu'elles atteignent l'épaisseur finale. Ensuite, elles sont recouvertes de résine liquide. Avant la polymérisation de la résine, l'imprégnation est terminée à l'aide de rouleaux, de brosses et de pinceaux (voir Fig II-9).

Une fois que la pièce est durcie, elle est démoulée et les excès sont retirés par roulage[81].

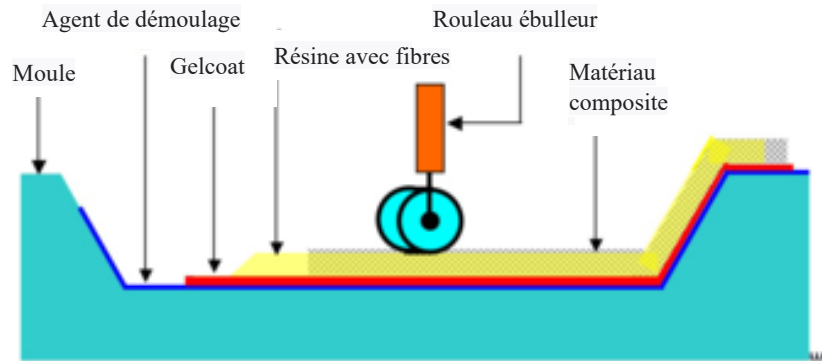


Fig II-9 Procédé de moulage au contact[82].

#### II.4.2 Moulage sous vide :

Cette méthode ressemble au moulage au contact, à la différence que l'opération est effectuée sous vide. Elle se déroule entre un moule et un contre-moule rigide, semi-rigide ou souple en fonction de la technologie utilisée. À l'intérieur du moule, on place le renfort (mat, tissu, préforme), puis on verse la résine catalysée sur le renfort. La pression exercée sur le moule pendant la mise sous vide est utilisée pour disperser la résine et imprégner le renfort. On peut aussi injecter la résine en utilisant une aspiration consécutive au vide[83] (voir Fig II-10).

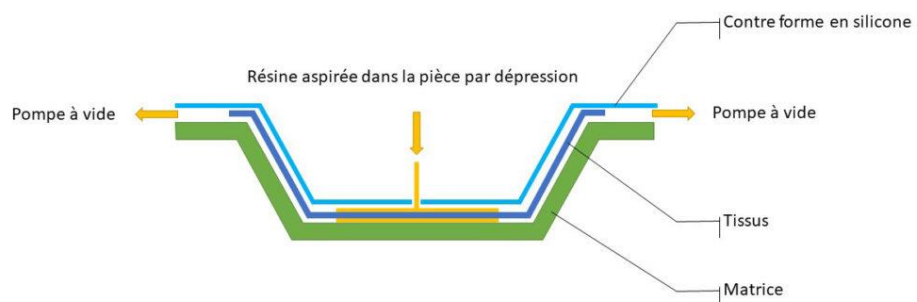


Fig II-10 Procédé de moulage sous vide.[84]

### II.4.3 Moulage par pultrusion :

Grâce à cette méthode de fabrication continue, il est possible de fabriquer des profilés de différentes sections à partir de renforts continus. La pultrusion combine différentes méthodes telles que la création de semi-produits de renfort, leur incorporation dans la résine, leur polymérisation, leur consolidation et leur solidification sur une même ligne. Les matières premières sont introduites à une extrémité de la ligne et le produit final est tiré par une machine de traction. On regroupe différents types de renforts avant de les placer dans un bain de résine liquide. Par la suite, le matériau est évacué à travers une filière chauffée (voir Fig II-11). Cela facilite l'intégration des renforts et donne la forme finale au composite. On peut également procéder à l'imprégnation en injectant de la résine[81].

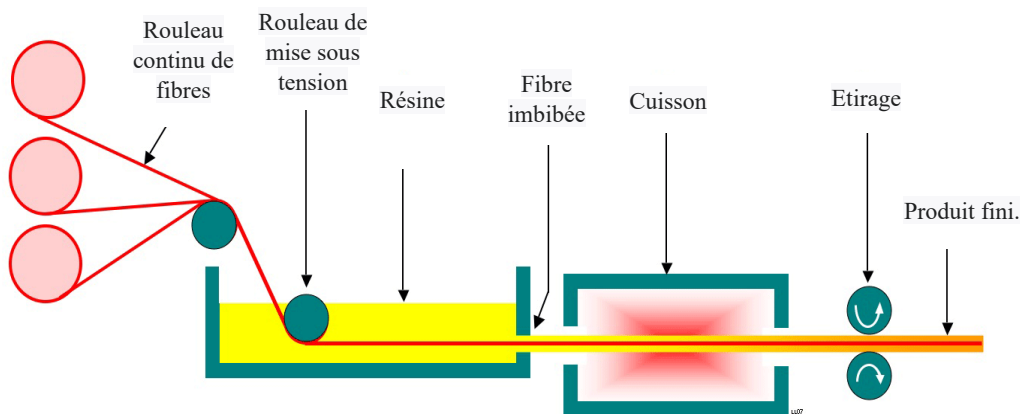


Fig II-11 Procédé de moulage par pultrusion [85]

### II.4.4 Moulage par injection :

Cette méthode implique de déposer le matériau (en granulés) dans une vis chauffée. Les granulés seront ramollis lorsque la vis allée sera entraînée à la température, ce qui les transformera en matière plastique fondue. Ensuite, on injecte sous pression le mélange de résine et de fibres dans un moule fermé. La mise en place de cette étape diminue la longueur moyenne des fibres[81] (voir Fig II-12).

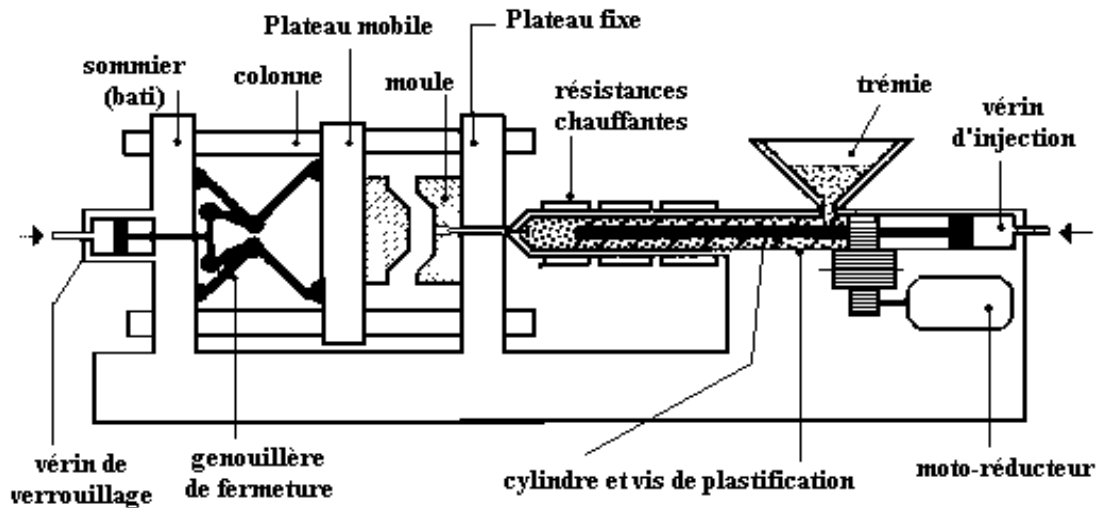


Fig II-12 Procédé de moulage par injection[86].

#### II.4.5 Moulage par injection de résine RTM :

Le moulage par injection de résine liquide (RTM) consiste à injecter une résine sous vide dans l'entrefer d'un moule rigide où le renfort est placé. L'équipement est composé d'un moule, d'un contre moule et d'une pompe à vide qui aspire la résine à travers le renfort jusqu'à ce que l'empreinte soit complètement recouverte. Il est également indispensable d'avoir un vide en périphérie pour la fermeture. Une fois que la résine a durci, on ouvre le moule et on démoule la pièce[87] (voir Fig II-13).

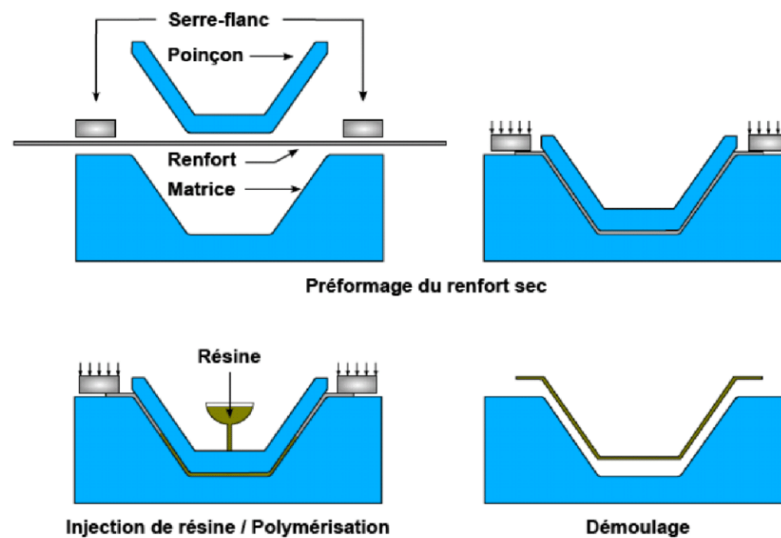


Fig II-13 Procédé RTM[88].

#### II.4.6 Moulage par infusion :

L'infusion repose sur la circulation principalement transversale de la résine à travers le renfort. Les autres techniques d'injection se distinguent par le fait qu'une dépression est imposée aux évents (infusion). Elle n'a pas besoin d'un contre-moule ni d'une étuve, ce qui réduit les dépenses d'investissement. Il n'y a qu'un demi-moule, un sac à vide est utilisé comme contre moule et est connecté à un ou plusieurs pots de résine par des canaux d'apport (voir Fig II-14).

Après avoir généré le vide, la résine liquide est aspirée et répartie en surface sous le sac, puis s'infiltre progressivement dans les renforts[87].

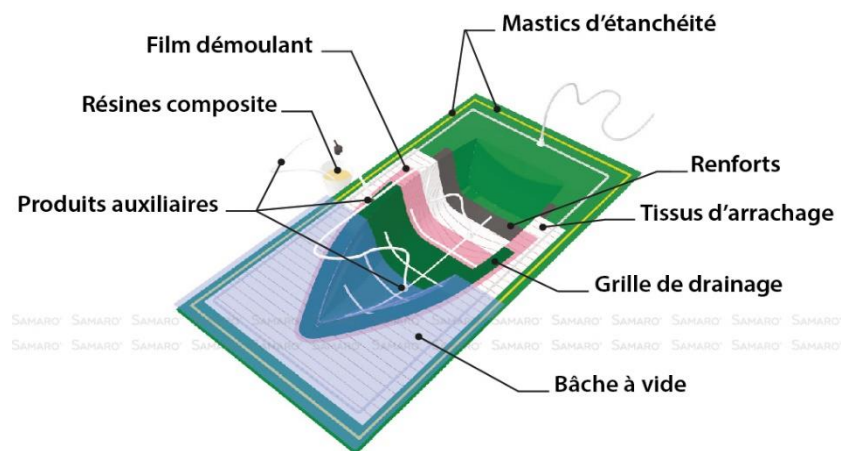


Fig II-14 Procédé de moulage par infusion[89].

#### II.4.7 Moulage par centrifugation:

On utilise ce procédé pour fabriquer des pièces de révolution creuse. En déposant le renfort et la résine dans un moule, la pièce est rotationnelle à l'intérieur d'un four, ce qui permet de répartir le mélange fibre/résine sur la surface interne du moule. Il est possible de fabriquer de grandes pièces de plusieurs mètres parfaitement étanches ainsi que des cuves coniques[81] (voir Fig II-15).

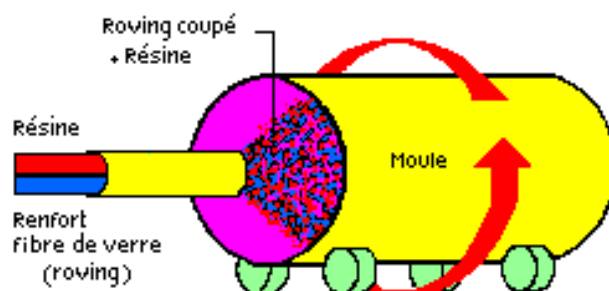


Fig II-15 Procédé de moulage par centrifugation[90].

## ***LA TROISIEME PARTIE***

# *CHAPITRE III*

## *Matériaux et méthodes expérimentales*

### III.1 Introduction :

Ce chapitre détaille les diverses techniques et méthodes employées pour l'élaboration de plusieurs matériaux composites à base de fibres végétales. Ce travail a été réalisé dans le laboratoire de génie mécanique de la faculté de technologie de l'université Mohammed Boudiaf de M'sila.

Les matériaux utilisés dans cette étude comprennent la matrice, le durcisseur, et les fibres végétales telles que l'Alfa, le DISS, le Jute et le Luffa, ainsi que les traitements appliqués à chacun d'eux.

La méthode d'élaboration des matériaux composites sera ensuite abordée, en expliquant les étapes et les procédés mis en œuvre pour combiner les différents composants. Enfin, les techniques de caractérisation utilisées pour évaluer les propriétés des composites seront présentées, avec un focus particulier sur les tests de résistance à la traction.

### III.2 Matériaux utilisés :

#### III.2.1 La matrice :

La matrice utilisée lors de cette étude est une résine d'époxy de référence VX100.00, fabriquée par la compagnie GENC (Figure III-1), Cette résine est destinée à la stratification due à sa bonne mouillabilité des renforts. Les principales caractéristiques de la résine sont regroupées dans le (Tableau III-1) [91].

Tableau III-1 caractéristiques de la résine .

Temps de séchage (20°C, 50-55%RH)		
	Epaisseur 3cm	Epaisseur 5cm
Sans poussière	20h	16h
temps de séchage au toucher	27h	21h
Temps d'application de la couche supérieure /multicouche	32h	25h
Empilable	72h	72h

Produit	Code	Par poids (%)	Par volume (%)
Ultra Transparent Glossy Casting Epoxy	VX100	100	100
Epoxy Hardener	HX100	28	38

Le terme « résines époxydes » peut désigner soit la résine de base, soit les produits finaux durcis à l'aide de diverses familles de durcisseurs.

Par ailleurs, les diverses familles commercialement disponibles permettent d'adapter les conditions de mise en œuvre (durée de vie du mélange et cycle de moulage).

Pour accélérer la polymérisation de la résine (monomères époxydes), il est essentiel d'utiliser un produit additif de réticulation afin de la rendre plus dure. Effectivement, l'époxy se compose de deux éléments A et B : la résine (A) et le durcisseur (B). Le durcisseur utilisé est de référence HX100.00 de la marque GENC (voir Fig III-1).



Fig III-1 la résine et le durcisseur utilisé.

### III.2.2 Les fibres végétales :

Les fibres d'Alfa, de Luffa, de Jute et de Diss ont été utilisées comme renforts pour la fabrication du matériau composite dans cette recherche. Chaque type de fibre présente des caractéristiques uniques qui contribuent différemment aux propriétés mécaniques du composite final.

#### III.2.2.1 Les fibres Alfa et Diss :

Ces fibres sont largement répandues sur le plateau méditerranéen, couvrant des milliers d'hectares en Algérie. Pour cette étude, les fibres ont été spécifiquement récoltées dans la wilaya de M'sila (voir Fig III-2).



Fig III-2 plante de diss et d'Alfa

Le processus de préparation des fibres commence par la coupe des extrémités des plantes, suivie de la récolte des tiges. Ces tiges sont ensuite placées dans de l'eau pendant une période de 25 à 30 jours afin de faciliter la séparation des fibres (voir Fig III-3).



Fig III-3 traitements naturels des plantes d'alfa et diss

Milliers d'hectares en Algérie. Dans notre cas, les fibres ont été récoltées dans la wilaya de M'sila.

L'extraction des fibres se fait par une méthode mécanique (voir Fig III-4), en utilisant un processus de brossage. Cette technique permet d'obtenir des fibres de haute qualité, prêtes à être utilisées comme renforts dans les composites. Pour les fibres de Diss, une étape supplémentaire est incluse pour améliorer leurs propriétés mécaniques : elles sont placées dans une étuve de séchage à une température de 70°C pendant 6 heures.

Ce traitement thermique aide à renforcer les fibres, augmentant ainsi leur résistance et leur durabilité.



Fig III-4 opération d'extraction des fibres par brossage

L'ensemble de ces étapes assure que les fibres d'Alfa, de Luffa, de Jute et de Diss sont prêtes pour être intégrées dans la matrice polymère, formant ainsi des composites qui bénéficient des propriétés mécaniques optimales des fibres naturelles. Ces composites peuvent être utilisés dans diverses applications industrielles, offrant une alternative durable et performante aux matériaux traditionnels.

#### **III.2.2.2 Les fibres de Luffa et Jute :**

La Luffa et le jute ont été acquis auprès de fournisseurs spécialisés. Une fois les matériaux reçus, ils ont été soigneusement préparés pour assurer leur adéquation aux exigences de notre étude expérimentale. La préparation a consisté en plusieurs étapes, incluant le nettoyage initial pour éliminer les impuretés, le séchage contrôlé pour atteindre une teneur en humidité optimale, et le découpage en formes spécifiques adaptées aux dimensions des éprouvettes requises (voir fig III-5 et 6). Cette préparation minutieuse est essentielle pour garantir des conditions de test uniformes et fiables, permettant ainsi une évaluation précise des propriétés mécaniques des composites renforcés par ces fibres naturelles.



Fig III-5 Fibre de Luffa



Fig III-6 Fibre de Jute

### III.3 Conception et réalisation du moule et plaques :

Pour la réalisation des plaques, la méthode de moulage au contact a été employée. Un moule et un contre-moule ont été conçus et ajustés avec précision pour garantir des formes et des dimensions spécifiques aux éprouvettes destinées aux essais mécaniques, tout en assurant un bon état de surface. Les étapes du processus sont détaillées comme suit (voir Fig III-7) :

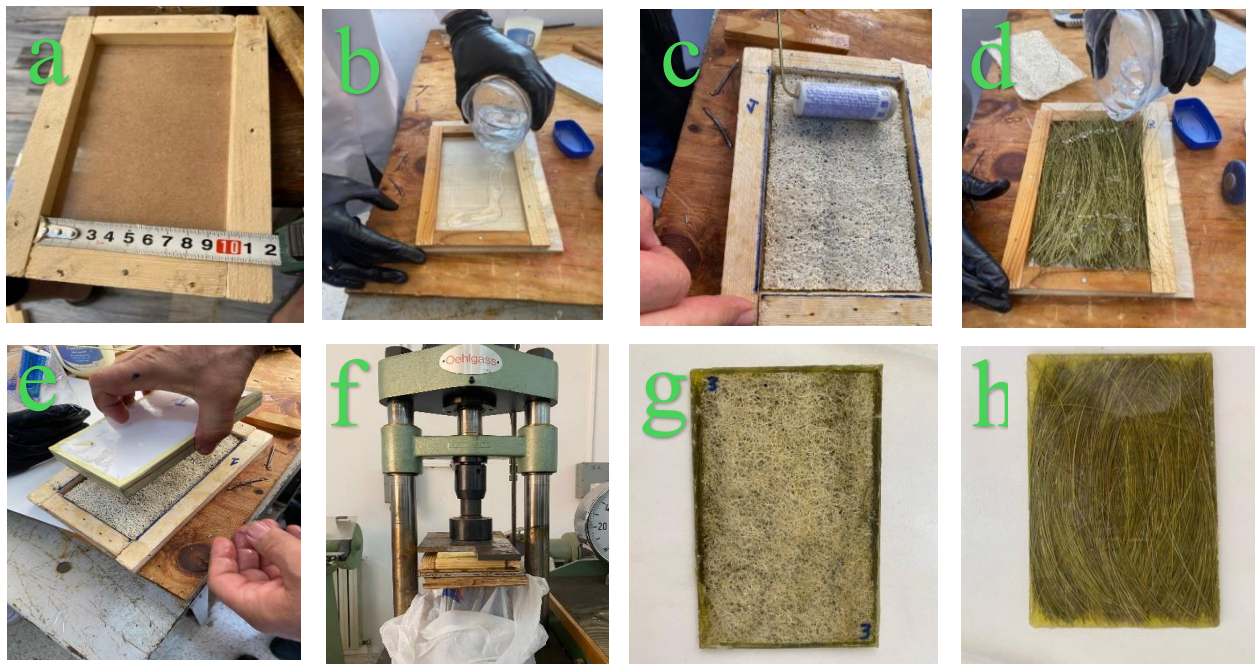


Fig III-7 les étapes de réalisation du moule et plaques

a) Conception des moules : Les moules ont été soigneusement conçus pour obtenir la géométrie souhaitée et les dimensions exactes des éprouvettes. Des matériaux de haute qualité ont été utilisés pour garantir une durabilité et une précision optimales.

b) Versement de la résine dans le moule : La résine époxy a été préparée selon les spécifications techniques, puis versée uniformément dans le moule pour éviter les bulles d'air et les irrégularités.

c) Placement d'une couche de fibres de Luffa dans le moule : Une première couche de fibres de Luffa a été placée dans le moule, soigneusement positionnée pour assurer une répartition homogène des fibres et une imprégnation optimale par la résine.

d) Ajout d'une couche de fibres d'Alfa et de résine : Une couche de fibres d'Alfa a été ajoutée par-dessus les fibres de Luffa, suivie par une autre couche de résine pour assurer l'adhésion et la cohésion entre les différentes couches de fibres.

e) Utilisation du contre-moule pour assurer l'épaisseur : Le contre-moule a été placé sur l'ensemble pour garantir une épaisseur uniforme et une compression adéquate des matériaux.

f) Application de la pression : La plaque a été mise sous pression pendant 48 heures pour permettre la polymérisation de la résine et assurer une bonne consolidation du composite.

g et h) Obtention de la plaque finale : Après le temps de cure, la plaque composite constituée de fibres de Luffa et d'Alfa a été démoulée, prête pour les essais mécaniques.

Ces étapes méthodiques assurent la qualité et la performance des plaques composites, permettant une évaluation rigoureuse de leurs propriétés mécaniques dans les conditions d'essai spécifiées.

#### III.4 Découpages des échantillons et usinages des éprouvettes :

Les plaques composites sont découpées conformément aux normes des essais mécaniques en utilisant une scie automatique, comme illustré dans la (voir fig III-8). Cette étape garantit que les dimensions et les formes des échantillons respectent les spécifications requises pour les tests mécaniques ultérieurs.

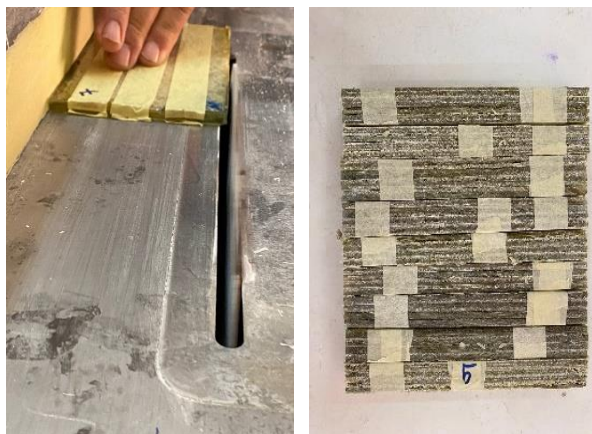


Fig III-8 Découpages des échantillons par une scie automatique

Les échantillons découpés sont ensuite soumis à un détourage de précision sur tout le pourtour de l'éprouvette à l'aide d'une machine CNC. Un dispositif de fixation spécialement conçu pour cette opération permet de positionner et de maintenir fermement les échantillons en place pendant l'usinage. Cette configuration garantit que les éprouvettes obtiennent la forme finale souhaitée avec une grande précision dimensionnelle et une finition de surface de haute qualité, des aspects cruciaux pour assurer la fiabilité et la reproductibilité des résultats des essais mécaniques. Le processus de détourage CNC est méticuleusement contrôlé pour minimiser les défauts de fabrication, tels que l'arrachement des fibres et le délaminage, assurant ainsi l'intégrité des échantillons pour des tests ultérieurs.



Vue d'ensemble avec éprouvette usinée- vue de dessus

Après le détournage, les éprouvettes de traction obtenues sont conformes aux dimensions normalisées spécifiées par la norme ASTM-D638-03 (voir Fig III-9). Cette norme est essentielle pour garantir que les échantillons utilisés dans les essais mécaniques de traction possèdent des dimensions précises et uniformes, permettant une comparaison fiable des résultats.

Les dimensions standardisées incluent la longueur totale de l'éprouvette, la largeur de la section de jauge, l'épaisseur et les dimensions des extrémités pour le montage dans la machine de test de traction (voir Fig III-9). Conformément à la norme ASTM-D638-03, les éprouvettes sont soigneusement usinées pour atteindre ces spécifications exactes. Cela inclut la précision des angles et des surfaces lisses pour éviter les concentrations de contraintes qui pourraient fausser les résultats des tests de traction.

Le respect de cette norme internationale garantit que les éprouvettes sont adaptées à des tests de traction rigoureux, fournissant des données fiables sur les propriétés mécaniques des composites, telles que la résistance à la traction, l'élasticité et la ductilité. Ces données sont cruciales pour évaluer la performance des matériaux composites dans diverses applications industrielles et pour poursuivre le développement de matériaux encore plus performants et durables.

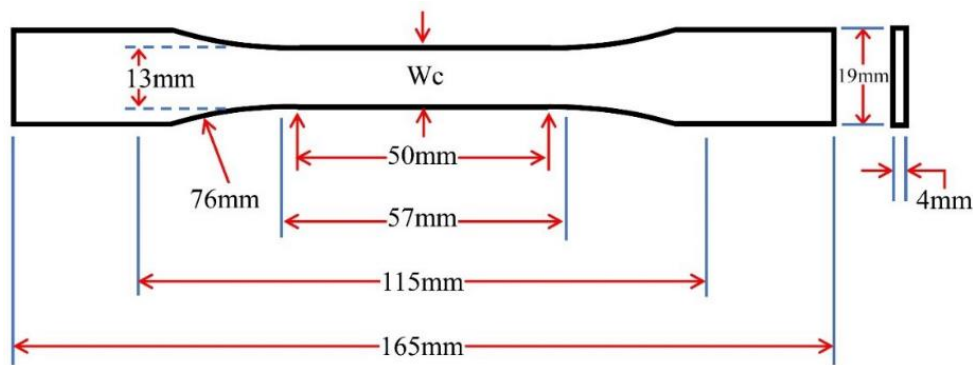


Fig III-9 Dimension de l'éprouvette de traction.

Les propriétés mécaniques que l'on peut déduire de cet essai de traction sont déterminées par les relations suivantes :

$$\sigma = E \times \varepsilon$$

$$\sigma = \frac{F}{S}$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}$$

où :

- $\varepsilon$  représente la déformation,
- $\Delta L$  est l'allongement mesuré en millimètres (mm),
- $L$  est la longueur initiale de l'éprouvette en millimètres (mm),
- $F$  est la charge appliquée sur l'éprouvette,
- $S$  est la section transversale de l'éprouvette.

$$A\% = (L_U - L_0) / L_0 \times 100$$

$L_U$  : longueur ultime (mesurée en raboutant les deux morceaux de l'éprouvette cassée).

$L_0$  : longueur initiale ou référence (la distance entre deux repères tracés sur l'éprouvette avant l'essai).

$$Z\% = (S_0 - S_U) 100 / S_0$$

$S_0$  : Section initiale (calculée en  $\text{mm}^2$  sur l'éprouvette avant l'essai).

$S_U$  : Section ultime (calculée en  $\text{mm}^2$  à partir du diamètre mesuré à l'endroit de la cassure de l'éprouvette cassée).

La première relation,  $\sigma = E \times \varepsilon$ , décrit la loi de Hooke, où  $\sigma$  est la contrainte et  $E$  le module d'élasticité ou module de Young. Cette relation est valide dans la région élastique du matériau, où la déformation est proportionnelle à la contrainte appliquée.

La deuxième relation,  $\sigma = \frac{F}{S}$ , définit la contrainte comme la charge appliquée par unité de surface de la section transversale de l'éprouvette. Cette formule est fondamentale pour calculer la contrainte mécanique dans le matériau lorsqu'il est soumis à une force.

La troisième relation,  $\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}$ , quantifie la déformation unitaire ou la déformation spécifique. Elle exprime le rapport entre l'allongement observé ( $\Delta L$ ) et la longueur initiale ( $L$ ) de l'éprouvette, indiquant ainsi comment le matériau s'étire sous l'effet de la charge appliquée.

La quatrième relation L'allongement ( $A\%$ ) indique l'aptitude d'un matériau à se déformer plastiquement sans se rompre, donc l'allongement est un indicateur de la ductilité du matériau.

$A\% > 5\%$  le matériau est considéré comme ductile.

$A\% < 5\%$  le matériau est considéré comme fragile.

Enfin, Le coefficient de striction ( $Z\%$ ) est aussi considéré comme un autre indicateur de ductilité du matériau.

Ces équations sont cruciales pour comprendre le comportement mécanique des matériaux composites testés. Elles permettent de déterminer des propriétés telles que la résistance à la traction, la rigidité et la ductilité des composites de fibres végétales comme le jute, le luffa, l'alfa et le diss. En respectant ces relations et en utilisant des échantillons usinés avec précision, les résultats obtenus offrent une vision claire de la performance des matériaux sous des charges mécaniques, guidant ainsi leur utilisation dans des applications industrielles variées.

### III.5 Plan d'expérience :

Dans cette section, nous présentons le Design of Expérimente (DOE) mis en place pour étudier les effets combinés de trois facteurs sur les propriétés mécaniques des composites renforcés par des fibres naturelles. Les facteurs étudiés sont la proportion de fibres de jute, la proportion de fibres de luffa, et la vitesse de traction lors des essais mécaniques. Chaque facteur a été évalué

à trois niveaux différents afin de permettre une analyse complète des interactions possibles et des effets principaux sur la résistance à la traction.

**a) Facteurs et Niveaux :**

Les trois facteurs et leurs niveaux respectifs sont les suivants :

- Proportion de fibres de d'Alfa (%) : Niveaux : 5%, 10%, 15%
- Proportion de fibres de luffa (%) : Niveaux : 5%, 10%, 15%
- Vitesse de traction (mm/min) : Niveaux : 2 mm/min, 5 mm/min, 8 mm/min

L'objectif principal de ce DOE est de déterminer l'impact des proportions de fibres d'alfa et de luffa, ainsi que de la vitesse de traction, sur la performance mécanique des composites. Plus spécifiquement, cette étude vise à :

- Évaluer les effets individuels de chaque facteur sur la résistance à la traction du composite.
- Identifier les interactions potentielles entre les différents facteurs.
- Optimiser les paramètres de fabrication pour maximiser les propriétés mécaniques du composite.

**b) Méthodologie**

Un plan factoriel complet  $3^3$  a été adopté pour cette étude, impliquant 27 combinaisons uniques d'expériences. Chaque combinaison a été testée pour examiner les variations et interactions entre les facteurs. Les étapes de l'expérimentation sont les suivantes :

Préparation des Échantillons :

Les échantillons composites ont été fabriqués en ajustant les proportions de fibres de jute et de luffa selon les niveaux spécifiés.

Réalisation des Tests de Traction :

Les essais de traction ont été effectués à différentes vitesses de traction (2 mm/min, 5 mm/min, 8 mm/min) pour chaque combinaison de proportions de fibres.

Les résultats des essais ont été analysés pour déterminer :

- Effets Principaux : L'impact individuel de chaque facteur (alfa, luffa, vitesse) sur la résistance à la traction.
- Interactions : Comment la combinaison de deux ou plusieurs facteurs influence la réponse.
- Optimisation : Identification des conditions optimales pour obtenir les meilleures propriétés mécaniques des composites.

Les données recueillies ont été traitées statistiquement pour extraire des conclusions significatives. Les analyses incluent des ANOVA (Analyse de la Variance) pour évaluer la significativité des effets et des interactions, ainsi que des analyses de régression pour modéliser les réponses en fonction des facteurs.

Finalement, l'utilisation d'un DOE permet de comprendre de manière systématique et rigoureuse les effets des proportions de fibres d'alfa et de luffa ainsi que de la vitesse de traction sur les performances mécaniques des composites. Cette approche offre une base solide pour optimiser les processus de fabrication et améliorer les propriétés des matériaux composites, contribuant ainsi à des applications industrielles plus efficaces et durables.

### III.6 Essai de traction :

Les essais de traction permettent de mesurer des grandeurs normalisées telles que la contrainte à rupture, la contrainte maximale, et la limite d'élasticité. L'application directe de la contrainte de traction uni-axiale est la méthode la plus précise, essentielle et simple pour obtenir ces mesures. Tout d'abord, une description générale de la machine de traction est présentée, suivie des informations sur les échantillons, les mesures de déformation et de la charge appliquée [19].

Une machine de traction se compose d'un corps principal avec une traverse mobile. L'éprouvette de traction, vissée ou serrée entre des mors en fonction de sa géométrie, est fixée à sa partie inférieure à la base de la machine et à sa partie supérieure à la traverse mobile (dans le cas d'une machine mécanique) ou au vérin de traction (dans le cas d'une machine hydraulique). La traction est réalisée par le déplacement de la traverse vers le haut. Cette machine est équipée d'une cellule de charge permettant d'évaluer l'effort appliqué à l'éprouvette et de suivre le déplacement de l'éprouvette de diverses manières. En général, les appareils expérimentaux sont asservis et peuvent être configurés pour fonctionner à vitesse de charge, à charge constante, ou à vitesse de déformation constante, en fonction des options disponibles sur le système de pilotage [92].

La machine de traction utilisée est la TesT 112, un modèle traditionnel pour évaluer les matériaux et les composants (voir Fig III-10). Cette série à deux colonnes couvre une plage de mesure allant jusqu'à 50 kN et peut être utilisée de manière flexible pour diverses applications en traction, compression et flexion. La construction de base est basée sur un modèle de table, mais peut également être conçue comme une version autonome en fonction de la plage de mesure ou de la hauteur de la zone de travail requise. Le TestController 850 est intégré à toutes les machines d'essais TesT de la série 106 à 115 et est compatible avec TEDS. Comme toutes



Fig III-10 La machine de traction utilisée

les machines d'essai universelles TesT à deux colonnes, le modèle 112 peut également utiliser la zone de travail supérieure, qui peut être sélectionnée par le logiciel avant le test. La série 112 offre une solution abordable pour une variété de tâches. La large sélection d'accessoires assure une variété d'utilisations, rendant cette machine polyvalente pour de nombreux types d'essais mécaniques [93].

## ***LA QUATRIEME PARTIE***

---

# *CHAPITRE IV*

## *Résultats et discussion*

## IV.1 Introduction :

Ce chapitre présente les résultats des caractérisations mécaniques d'un matériau composite hybride à base de fibres végétales de Luffa et d'Alfa. L'analyse des résultats expérimentaux est d'abord exposée, suivie d'une comparaison entre les différents facteurs et leurs niveaux respectifs. Les trois facteurs étudiés sont :

- Proportion de fibres d'Alfa (%) : Trois niveaux sont examinés : 5%, 10%, et 15%.
- Proportion de fibres de Luffa (%) : Les niveaux testés sont également de 5%, 10%, et 15%.
- Vitesse de traction (mm/min) : Les vitesses de traction évaluées sont 2 mm/min, 5 mm/min, et 8 mm/min.

Cette analyse détaillée permet de comprendre l'influence de chaque facteur sur les propriétés mécaniques du composite hybride. Les résultats obtenus fournissent des informations précieuses pour l'optimisation des matériaux composites en fonction des besoins spécifiques des applications industrielles. En examinant les interactions entre les proportions de fibres et les vitesses de traction, cette étude vise à déterminer les combinaisons optimales pour améliorer la performance globale du composite.

## IV.2 Propriétés mécaniques :

### IV.2.1 Essai de traction :

Après avoir usiné et préparé les éprouvettes selon les normes, celles-ci sont codées en fonction des pourcentages d'Alfa et de Luffa, comme indiqué dans le Tableau IV.1. Les résultats des essais de traction effectués sur ces diverses formulations sont présentés sous forme de courbes contrainte-déformation. Ces courbes montrent un comportement mécanique cohérent à travers toutes les formulations testées. Plus précisément, les courbes révèlent que les matériaux se déforment de manière élastique jusqu'à la rupture, sans présenter de déformations plastiques notables. Cela suggère que les composites se comportent principalement comme des matériaux fragiles, caractérisés par une phase de déformation élastique suivie d'une rupture soudaine, sans déformation permanente avant la fracture.

Ce comportement mécanique, typique des matériaux fragiles, est essentiel pour comprendre la performance des composites hybrides à base de fibres de Luffa et d'Alfa sous contrainte. Les essais de traction permettent d'évaluer plusieurs paramètres mécaniques cruciaux, tels que la contrainte maximale à rupture, le module de Young, et la déformation à

rupture. Ces paramètres sont fondamentaux pour déterminer l'aptitude de ces composites à diverses applications industrielles. Les essais mettent également en lumière l'impact des différentes proportions de fibres et des vitesses de traction sur les propriétés mécaniques globales des composites, fournissant ainsi des informations précieuses pour l'optimisation des formulations de matériaux.

Tableau IV. 1. Pourcentage d'Alfa et de Luffa pour chaque éprouvette

Eprouvette	Tenure en Alfa/Luffa
A	5% Luffa et 5% Alfa
B	5% Luffa et 10% Alfa
C	5% Luffa et 15% Alfa
D	10% Luffa et 5% Alfa
E	10% Luffa et 10% Alfa
F	10% Luffa et 15% Alfa
G	15% Luffa et 5% Alfa
H	15% Luffa et 10% Alfa
I	15% Luffa et 15% Alfa

#### IV.2.1.1 Analyse des Caractéristiques Mécaniques des Composites Luffa/Alfa à une Vitesse de Traction de 2mm/min :

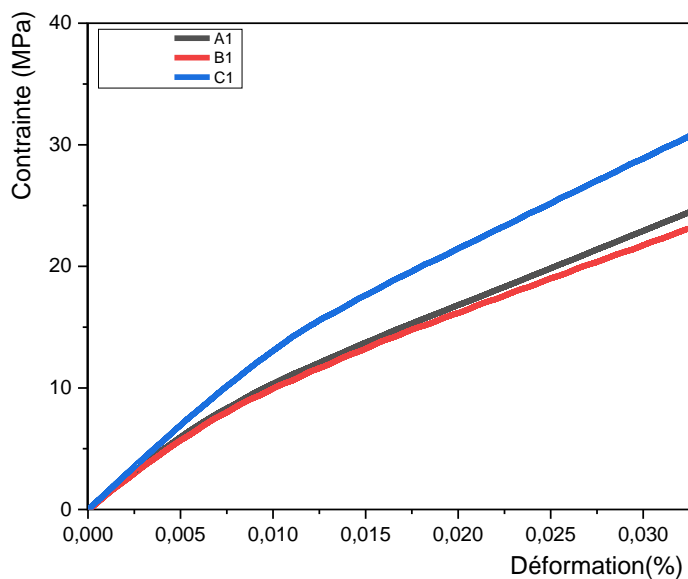


Fig IV-1 Courbes (contrainte-déformation) des essais de traction pour les éprouvettes, A1, B1 et C1 réalisées à une vitesse de traction de 2 mm/min

Tableau IV. 2 Caractéristiques mécaniques du composite hybride Alfa/Luffa à 5% de Luffa et différents pourcentages d'Alfa pour une vitesse de 2 mm/min

Proportion de fibres	Code	Contrainte (MPa)	Module du Young (MPa)	Déformation (%)
5% Luffa, 5% Alfa	A1	34.73	657.49	0.04
5% Luffa, 10% Alfa	B1	25.99	643.03	0.03
5% Luffa, 15% Alfa	C1	44.72	795.90	0.05

La Figure IV-1 illustre les courbes de contrainte-déformation obtenues lors des essais de traction pour les trois types d'éprouvettes, à savoir A1, B1 et C1 pour une vitesse de traction de 2 mm/min. Le tableau IV.2 présente les caractéristiques mécaniques des composites hybrides en fonction de la proportion de fibres de Luffa et d'Alfa. Les résultats montrent une variation notable des propriétés mécaniques en fonction de la composition des fibres. Pour une proportion de 5% de Luffa et 5% d'Alfa, la contrainte à rupture est de 34.73 MPa, le module de Young est de 657.49 MPa, et la déformation à rupture est de 0.04%. Cette configuration initiale sert de référence pour évaluer l'impact de l'augmentation de la teneur en fibres d'Alfa.

En augmentant la teneur en Alfa à 10%, tout en maintenant 5% de Luffa, la contrainte à rupture diminue à 25.99 MPa, et le module de Young est légèrement réduit à 643.03 MPa. La déformation à rupture diminue également à 0.03%. Cette diminution de la contrainte et de la déformation peut indiquer une moins bonne intégration ou interaction des fibres dans la matrice composite à cette concentration spécifique.

En revanche, en augmentant la teneur en Alfa à 15% avec toujours 5% de Luffa, la contrainte à rupture augmente de manière significative à 44.72 MPa, et le module de Young s'élève à 795.90 MPa. La déformation à rupture atteint 0.05%, ce qui est la plus élevée parmi les trois configurations testées. Cette amélioration notable des propriétés mécaniques suggère une meilleure synergie entre les fibres de Luffa et d'Alfa à cette proportion, conduisant à un composite plus robuste et plus élastique.

En résumé, les composites hybrides montrent une variabilité des propriétés mécaniques en fonction de la proportion des fibres de Luffa et d'Alfa. La proportion de 5% de Luffa et 15% d'Alfa présente les meilleures caractéristiques mécaniques, avec la plus haute contrainte à rupture et module de Young, ainsi qu'une déformation à rupture maximale, indiquant une

amélioration significative de la résistance et de la flexibilité du matériau composite à cette proportion.

La Figure IV-2 montre les courbes de contrainte-déformation obtenues lors des essais de traction pour les trois types d'éprouvettes, à savoir D1, E1 et F1, toutes réalisées à une vitesse de traction de 2 mm/min.

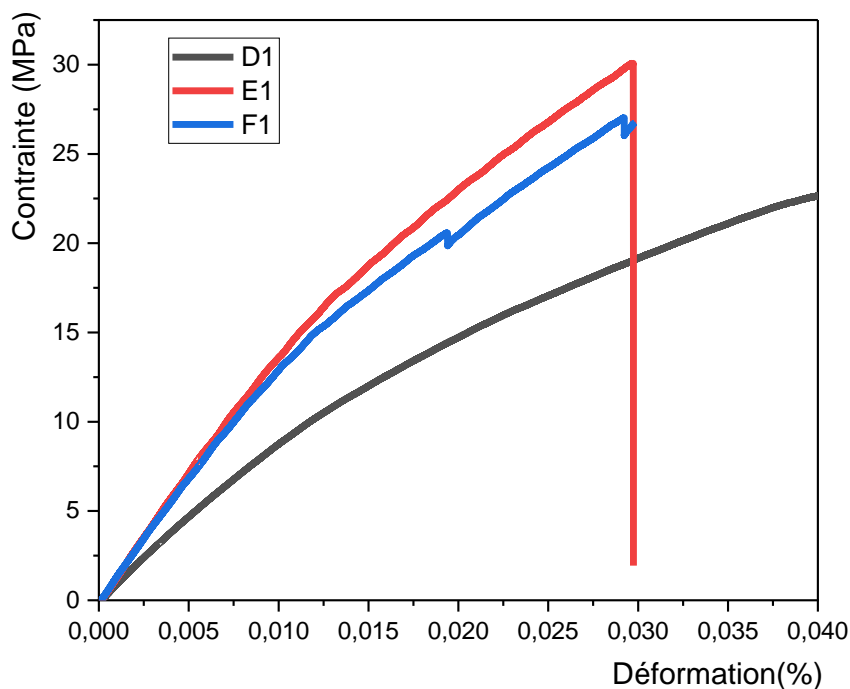


Fig IV-2 Courbes (contrainte-déformation) des essais de traction pour les éprouvettes, D1, E1 et F1 réalisées à une vitesse de traction de 2 mm/min.

L'analyse des données du Tableau IV-3 met en évidence l'effet de la proportion de fibres d'Alfa sur les propriétés mécaniques du composite hybride composé de 10% de fibres de Luffa et de différents pourcentages de fibres d'Alfa. Le composite D1, avec 10% de Luffa et 5% d'Alfa, présente une contrainte maximale de 22.75 MPa, un module de Young de 530.41 MPa et une déformation de 0.042%. En augmentant la proportion d'Alfa à 10% (E1), la contrainte maximale atteint 30.07 MPa, et le module de Young augmente de manière significative à 996.37 MPa, tandis que la déformation diminue à 0.029%. Cependant, en augmentant la proportion d'Alfa à 15% (F1), la contrainte maximale diminue légèrement à 27.02 MPa, et le module de Young à 881.74 MPa, avec une déformation stable à 0.029%.

Ces résultats montrent que l'ajout de fibres d'Alfa jusqu'à 10% améliore considérablement la résistance et la rigidité du composite, comme en témoigne l'augmentation de la contrainte

maximale et du module de Young, tout en réduisant la déformation. Toutefois, une proportion de 15% d'Alfa n'améliore pas davantage ces propriétés de manière significative par rapport à 10% d'Alfa. En fait, il y a une légère diminution de la contrainte maximale et du module de Young. Cela suggère qu'il existe une proportion optimale de fibres d'Alfa (10%) qui maximise la résistance et la rigidité du composite, tandis que des proportions plus élevées ne fournissent pas de gains supplémentaires significatifs et pourraient même entraîner une légère diminution des performances mécaniques.

Tableau IV- 3 Caractéristiques mécaniques du composite hybride Alfa/Luffa à 10% de Luffa et différents pourcentages d'Alfa pour une vitesse de 2 mm/min

Proportion de fibres	Code	Contrainte (MPa)	Module du Young (MPa)	Déformation (%)
10% Luffa, 5% Alfa	D1	22.75	530.41	0.042
10% Luffa, 10% Alfa	E1	30.07	996.37	0.029
10% Luffa, 15% Alfa	F1	27.02	881.74	0.029

La Figure IV-3 montre les courbes de contrainte-déformation obtenues lors des essais de traction pour les trois types d'éprouvettes, à savoir G1, H1 et I1, toutes réalisées à une vitesse de traction de 2 mm/min.

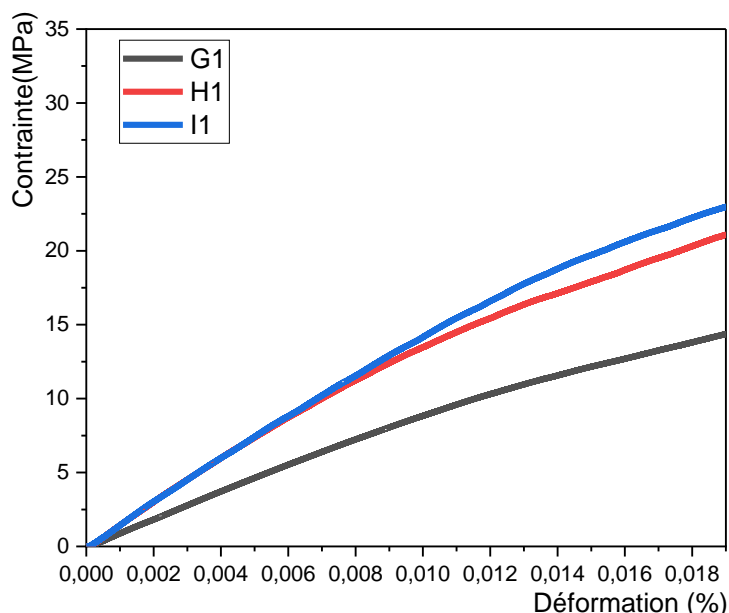


Fig IV-3 Courbes (contrainte-déformation) des essais de traction pour les éprouvettes, G1, H1 et I1 réalisées à une vitesse de traction de 2 mm/min

L'analyse des données du Tableau IV-4 révèle l'impact de la proportion de fibres d'Alfa sur les propriétés mécaniques du composite hybride contenant 15% de fibres de Luffa et différents pourcentages de fibres d'Alfa, à la même vitesse de traction de 2 mm/min. Le composite G1, composé de 15% de Luffa et de 5% d'Alfa, présente une contrainte maximale de 19.49 MPa, un module de Young de 642.48 MPa et une déformation de 0.029%. En augmentant la proportion de fibres d'Alfa à 10% (E1), la contrainte maximale augmente significativement à 29.98 MPa et le module de Young atteint 955.37 MPa, tandis que la déformation reste constante à 0.029%. Lorsque la proportion de fibres d'Alfa est augmentée à 15% (F1), la contrainte maximale diminue légèrement à 27.64 MPa et le module de Young à 939.50 MPa, avec une déformation toujours stable à 0.029%.

Ces résultats montrent que l'augmentation de la proportion de fibres d'Alfa jusqu'à 10% améliore considérablement la résistance et la rigidité du composite, ce qui est illustré par l'augmentation de la contrainte maximale et du module de Young. Cependant, une augmentation supplémentaire de la proportion de fibres d'Alfa à 15% n'améliore pas davantage ces propriétés et entraîne même une légère diminution de la contrainte maximale et du module de Young par rapport à la proportion de 10%.

Tableau IV- 4 Caractéristiques mécaniques du composite hybride Alfa/Luffa à 15% de Luffa et différents pourcentages d'Alfa pour une vitesse de 2 mm/min

Proportion de fibres	Code	Contrainte (MPa)	Module du Young (MPa)	Déformation (%)
15% Luffa, 5% Alfa	G1	19.49	642.48	0.029
15% Luffa, 10% Alfa	E1	29.98	955.37	0.029
15% Luffa, 15% Alfa	F1	27.64	939.50	0.029

Ainsi, il semble y avoir une proportion optimale de fibres d'Alfa à 10% lorsque combinée avec 15% de Luffa, qui maximise la résistance et la rigidité du composite. Des proportions plus élevées de fibres d'Alfa ne semblent pas apporter d'amélioration supplémentaire significative et peuvent même légèrement diminuer les performances mécaniques. En résumé, l'équilibre

optimal des proportions de fibres d'Alfa et de Luffa est crucial pour obtenir les meilleures propriétés mécaniques possibles du composite.

La figure IV-4 montre la variation du coefficient de striction  $Z\%$  en fonction de la teneur en Luffa/Alfa. Cette figure montre que les valeurs de striction sont relativement modérées pour la plupart des échantillons sauf pour I1 (15% Luffa, 15% Alfa) qui montre un pic significatif, suggérant une contraction importante lors de la rupture. Les éprouvettes A1 à F1 montrent des valeurs de striction assez constantes avec quelques variations mineures, indiquant une réponse cohérente sous tension.

I1 présente une augmentation marquée de la striction, ce qui pourrait être lié à une interaction plus complexe ou plus serrée entre les fibres à des concentrations élevées, influençant la manière dont le matériau se contracte sous charge.

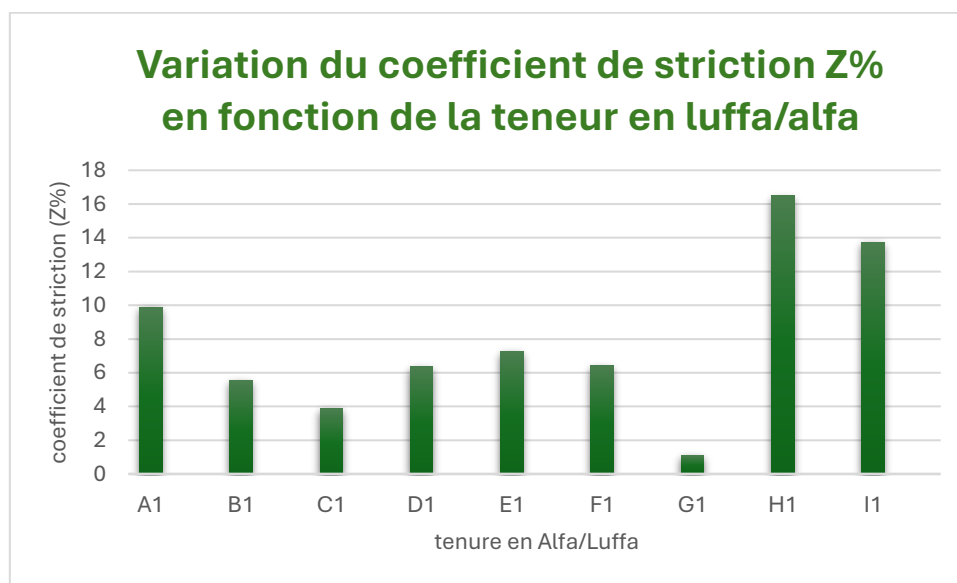


Fig IV-4 Histogramme de variation du coefficient de striction  $Z\%$  en fonction de la teneur en Luffa/Alfa pour une vitesse de 2 mm/min

La Figure IV-5 montre la variation de la résistance à la rupture en fonction de la teneur en Luffa/Alfa. La résistance maximale est observée pour A1 (5% Luffa, 5% Alfa) avec une valeur proche de 45 MPa, indiquant une très bonne capacité de charge pour cette composition.

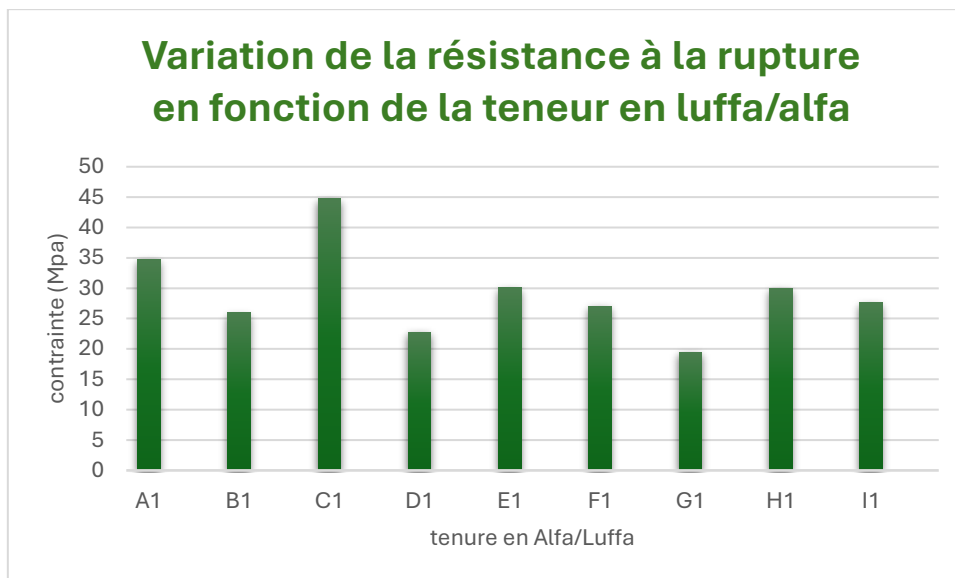


Fig IV-5 Histogramme de variation de la résistance à la rupture en fonction de la teneur en Luffa/Alfa pour une vitesse de 2 mm/min

Les échantillons avec 10% Luffa (E1, F1) affichent également de hautes valeurs de résistance, ce qui suggère une optimisation de la concentration des fibres pour atteindre une résistance maximale.

D1 (10% Luffa, 5% Alfa) présente une diminution notable de la résistance comparée à A1, ce qui pourrait être attribué à une interaction moins efficace à cette teneur spécifique en fibres.

E1 et F1 montrent des améliorations, avec E1 atteignant les niveaux de résistance les plus élevés pour les échantillons avec 10% de Luffa, suggérant que l'augmentation de la teneur en Alfa améliore la résistance à la rupture jusqu'à un certain point.

Les valeurs diminuent légèrement pour G1, H1, et I1, avec H1 montrant une augmentation relative, ce qui pourrait indiquer des différences dans la qualité de dispersion des fibres ou dans les méthodes de traitement des composites

La figure IV-6 montre la variation de l'allongement A (%) en fonction de la teneur en fibres de Luffa et d'Alfa. L'allongement maximal est observé pour l'échantillon C1, avec un allongement exceptionnellement élevé d'environ 5%. Les autres échantillons présentent des allongements plus modestes, généralement inférieurs à 2%. Pour l'échantillon A1 (5% Luffa, 5% Alfa), l'allongement est modéré, autour de 2%, suggérant une bonne ductilité et une interaction efficace entre les fibres et la matrice à ce niveau de remplissage.

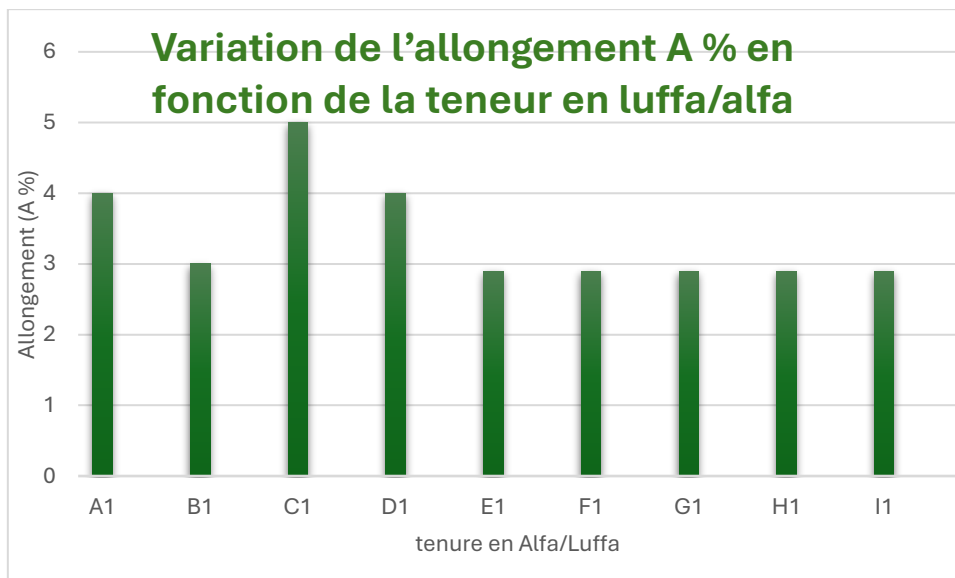


Fig IV-6 Histogramme de variation de l'Allongement A (%) en Fonction de la Teneur en Luffa/Alfa

L'échantillon B1 (5% Luffa, 10% Alfa) montre une légère diminution de l'allongement par rapport à A1, ce qui pourrait indiquer que l'augmentation de la teneur en fibres d'Alfa sans augmentation proportionnelle de Luffa ne favorise pas nécessairement la ductilité.

Pour C1 (10% Luffa, 5% Alfa), un pic d'allongement est observé, suggérant une particularité dans la composition ou le traitement qui favorise une extensibilité exceptionnelle.

L'échantillon D1 (10% Luffa, 10% Alfa) montre une forte diminution de l'allongement après le pic observé pour C1, ce qui pourrait indiquer une saturation ou une moins bonne répartition des fibres à cette concentration.

Les échantillons E1 à I1 (différentes compositions avec 10% et 15% de Luffa) présentent des allongements relativement constants et modérés. E1, F1, G1, H1, et I1 maintiennent une ductilité similaire, indiquant que l'augmentation de la proportion de fibres d'Alfa à ces niveaux de Luffa ne modifie pas significativement la capacité du matériau à s'étirer. Cette constance pourrait être due à une bonne distribution des fibres ou à une saturation des effets de renforcement des fibres d'Alfa.

#### IV.2.1.2 Analyse des Caractéristiques Mécaniques des Composites Luffa/Alfa à une Vitesse de Traction de 5 mm/min :

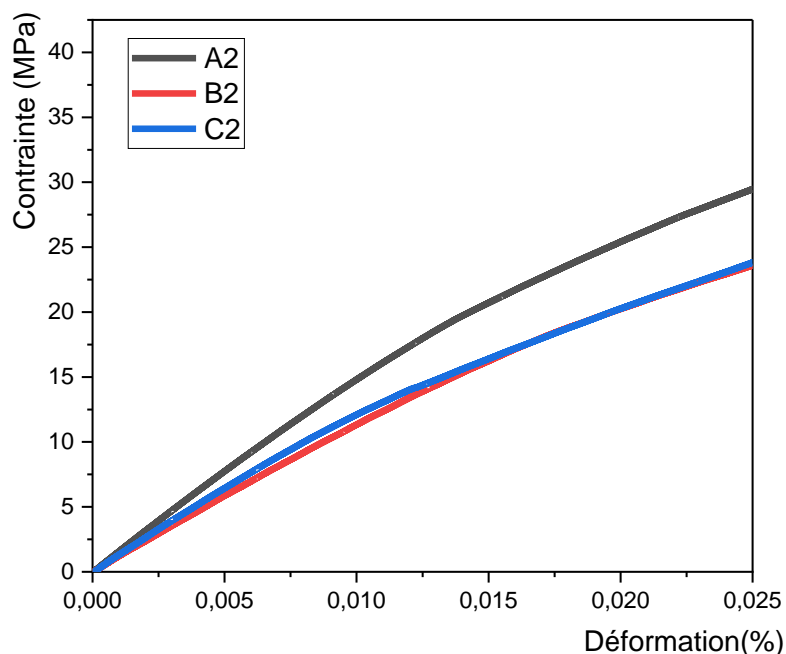


Fig IV-7 Courbes (contrainte-déformation) des essais de traction pour les éprouvettes, A2, B2 et C2 réalisées à une vitesse de traction de 5 mm/min

Tableau IV- 5 Caractéristiques mécaniques du composite hybride Alfa/Luffa à 5% de Luffa et différents pourcentages d'Alfa pour une vitesse de 5 mm/min

Proportion de fibres	Code	Contrainte (MPa)	Module du Young (MPa)	Déformation (%)
5% Luffa, 5% Alfa	A2	38.42	1011.77	0.036
5% Luffa, 10% Alfa	B2	30.36	819.19	0.036
5% Luffa, 15% Alfa	C2	32.00	837.04	0.036

Le tableau IV-5 présente les caractéristiques mécaniques du composite contenant 5% de fibres de Luffa et différentes proportions de fibres d'Alfa, pour une vitesse de traction de 5 mm/min. La figure IV. 7 et le tableau IV-5 montrent que l'échantillon A2 (5% Luffa, 5% Alfa) présente la plus haute contrainte de 38.42 MPa et le module de Young le plus élevé de 1011.77 MPa,

avec une déformation de 0.036%. Ces résultats suggèrent que cette proportion équilibrée de Luffa et d'Alfa permet d'obtenir une bonne combinaison de rigidité et de résistance à la traction. L'échantillon B2 (5% Luffa, 10% Alfa) présente une contrainte plus faible de 30.36 MPa et un module de Young de 819.19 MPa, tout en conservant la même déformation de 0.036%. La diminution de la contrainte et du module de Young par rapport à A2 indique que l'augmentation de la proportion de fibres d'Alfa, sans augmenter les fibres de Luffa, réduit la rigidité et la résistance du composite.

L'échantillon C2 (5% Luffa, 15% Alfa) montre une légère augmentation de la contrainte à 32.00 MPa par rapport à B2, mais avec un module de Young de 837.04 MPa, légèrement supérieur à celui de B2 mais toujours inférieur à celui de A2. La déformation reste constante à 0.036%. Cette légère augmentation de la contrainte pourrait indiquer une amélioration marginale de la performance mécanique due à la teneur accrue en fibres d'Alfa, bien que le module de Young ne retrouve pas le niveau observé pour A2.

En résumé, le tableau montre que pour une vitesse de traction de 5 mm/min, une proportion équilibrée de fibres de Luffa et d'Alfa (comme dans A2) offre les meilleures performances mécaniques en termes de contrainte et de rigidité. Augmenter la teneur en fibres d'Alfa au-delà de 5% sans augmenter la proportion de Luffa tend à diminuer ces propriétés, bien que la déformation reste constante à travers les différentes proportions de fibres.

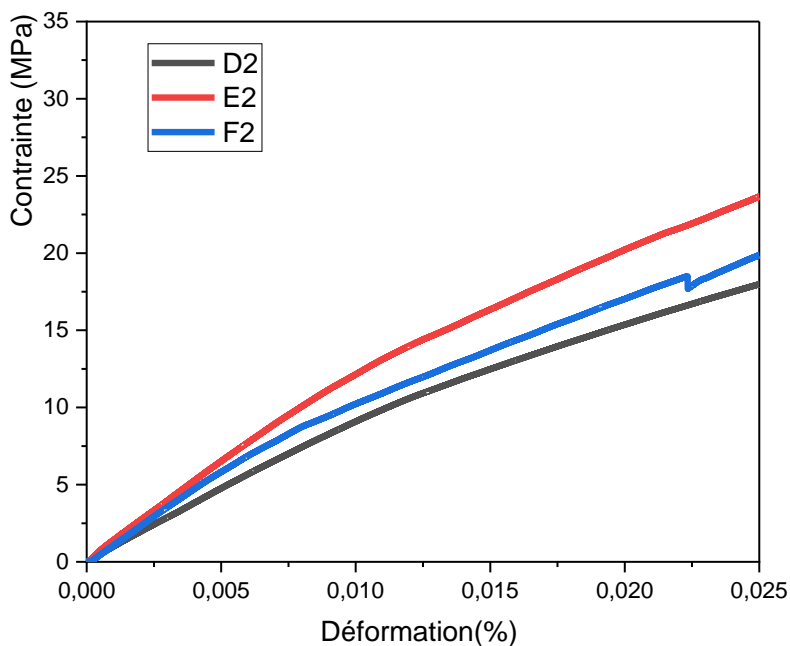


Fig IV-8 Courbes (contrainte-déformation) des essais de traction pour les éprouvettes, D2, E2 et F2 réalisées à une vitesse de traction de 5 mm/mi

Tableau IV- 6 Caractéristiques mécaniques du composite hybride Alfa/Luffa à 10% de Luffa et différents pourcentages d'Alfa pour une vitesse de 5 mm/min

Proportion de fibres	Code	Contrainte (MPa)	Module du Young (MPa)	Déformation (%)
10% Luffa, 5% Alfa	D2	23.34	616.31	0.036
10% Luffa, 10% Alfa	E2	32.23	836.71	0.036
10% Luffa, 15% Alfa	F2	27.20	699.06	0.036

Le tableau IV-6 présente les caractéristiques mécaniques du avec 10% de fibres de Luffa et différentes proportions de fibres d'Alfa, pour une vitesse de traction de 5 mm/min.

Selon la Figure IV. 8 et le tableau IV. 6, l'échantillon D2 (10% Luffa, 5% Alfa) montre une contrainte de 23.34 MPa, un module de Young de 616.31 MPa, et une déformation de 0.036%. Ces résultats indiquent que cette proportion relativement faible de fibres d'Alfa avec 10% de Luffa offre une rigidité et une résistance modérées.

L'échantillon E2 (10% Luffa, 10% Alfa) présente une contrainte plus élevée de 32.23 MPa et un module de Young de 836.71 MPa, tout en conservant la même déformation de 0.036%. L'augmentation des fibres d'Alfa à 10% améliore significativement à la fois la résistance et la rigidité du composite par rapport à D2, suggérant une meilleure synergie entre les fibres de Luffa et d'Alfa à cette proportion.

L'échantillon F2 (10% Luffa, 15% Alfa) montre une contrainte de 27.20 MPa et un module de Young de 699.06 MPa, avec une déformation toujours à 0.036%. Par rapport à E2, l'augmentation des fibres d'Alfa à 15% entraîne une diminution de la contrainte et du module de Young, bien que ces valeurs restent supérieures à celles de D2. Cela peut indiquer qu'il y a une proportion optimale de fibres d'Alfa (en l'occurrence 10%) qui maximise la rigidité et la résistance, et que dépasser cette proportion peut entraîner une diminution de ces propriétés.

En résumé, le tableau montre que pour une teneur constante de 10% de Luffa, l'ajout de 10% de fibres d'Alfa (comme dans E2) offre les meilleures performances mécaniques en termes de contrainte et de rigidité. Des proportions plus faibles ou plus élevées de fibres d'Alfa tendent à diminuer ces propriétés, suggérant l'existence d'un ratio optimal de fibres pour maximiser les caractéristiques mécaniques du composite hybride Alfa/Luffa.

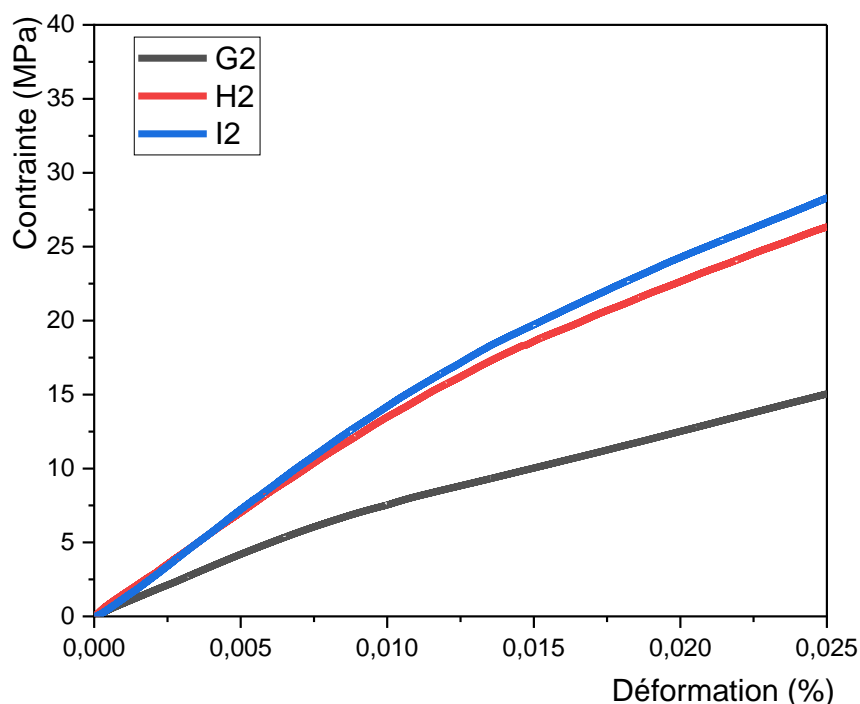


Fig IV-9 Courbes (contrainte-déformation) des essais de traction pour les éprouvettes, G2, H2 et I2 réalisées à une vitesse de traction de 5 mm/min

Tableau IV- 7 Caractéristiques mécaniques du composite hybride Alfa/Luffa à 15% de Luffa et différents pourcentages d'Alfa pour une vitesse de 5 mm/min

Proportion de fibres	Code	Contrainte (MPa)	Module du Young (MPa)	Déformation (%)
15% Luffa, 5% Alfa	G2	20.22	527.28	0.03
15% Luffa, 10% Alfa	H2	32.70	930.38	0.03
15% Luffa, 15% Alfa	I2	35.49	1008.8	0.03

Le tableau IV-7 présente les caractéristiques mécaniques du composite hybride Alfa/Luffa avec une teneur constante de 15% en fibres de Luffa et différentes proportions de fibres d'Alfa, pour une vitesse de traction de 5 mm/min.

L'échantillon G2 (15% Luffa, 5% Alfa) montre une contrainte de 20.22 MPa (Fig. IV. 9), un module de Young de 527.28 MPa, et une déformation de 0.03%. Ces valeurs suggèrent une

résistance et une rigidité relativement faibles, ce qui indique que cette proportion de fibres d'Alfa ne renforce pas suffisamment le composite.

L'échantillon H2 (15% Luffa, 10% Alfa) présente une contrainte de 32.70 MPa et un module de Young de 930.38 MPa, tout en maintenant la même déformation de 0.03%. L'augmentation des fibres d'Alfa à 10% améliore significativement la résistance et la rigidité du composite par rapport à G2, ce qui démontre une meilleure interaction et une contribution positive des fibres d'Alfa à ces niveaux.

L'échantillon I2 (15% Luffa, 15% Alfa) affiche une contrainte de 35.49 MPa et un module de Young de 1008.8 MPa, avec une déformation toujours à 0.03%. L'augmentation des fibres d'Alfa à 15% continue d'améliorer les propriétés mécaniques du composite, offrant les meilleures performances en termes de résistance et de rigidité parmi les échantillons testés.

En résumé, les résultats du tableau indiquent que pour une teneur constante de 15% en fibres de Luffa, l'augmentation de la proportion de fibres d'Alfa améliore les caractéristiques mécaniques du composite. La meilleure performance est observée avec l'échantillon I2 (15% Luffa, 15% Alfa), ce qui suggère que l'augmentation de la proportion de fibres d'Alfa jusqu'à 15% est bénéfique pour maximiser la résistance et la rigidité du composite hybride Alfa/Luffa. Ces résultats montrent une corrélation positive entre la teneur en fibres d'Alfa et les propriétés mécaniques du composite dans les limites testées.

#### ❖ Variation du coefficient de striction Z% en fonction de la teneur en Luffa/Alfa

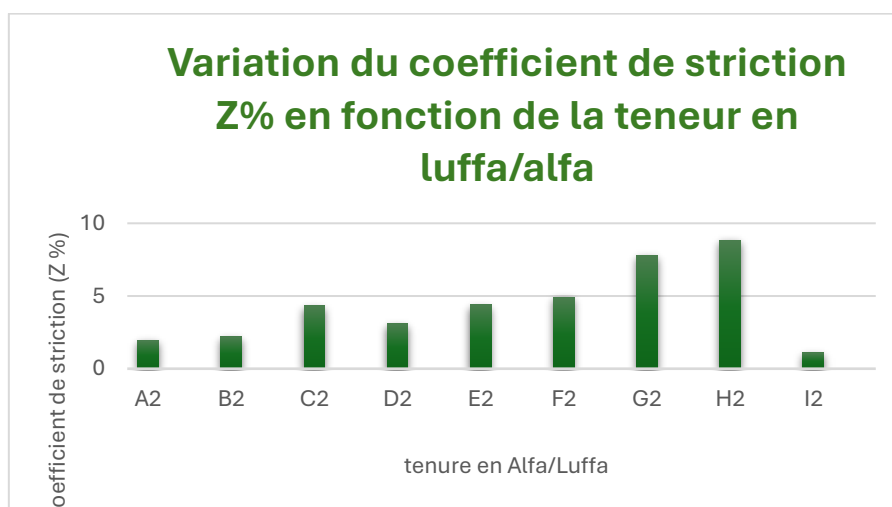


Fig IV-10 Histogramme de variation du coefficient de striction Z% en fonction de la teneur en Luffa/Alfa

Le coefficient de striction mesure le degré auquel un matériau se rétrécit transversalement lorsqu'il est étiré jusqu'à la rupture. Ce paramètre est crucial pour comprendre le comportement du matériau sous contrainte.

La figure IV. 10 montre que les valeurs de striction montrent une tendance croissante avec une proportion croissante d'Alfa, atteignant des pics significatifs pour les échantillons G2, H2, et surtout I2. Cette tendance suggère que les composites avec des teneurs plus élevées en Alfa peuvent subir des contractions plus importantes lors de la rupture, ce qui peut indiquer une interaction plus forte ou une adhérence accrue entre les fibres et la matrice à ces concentrations.

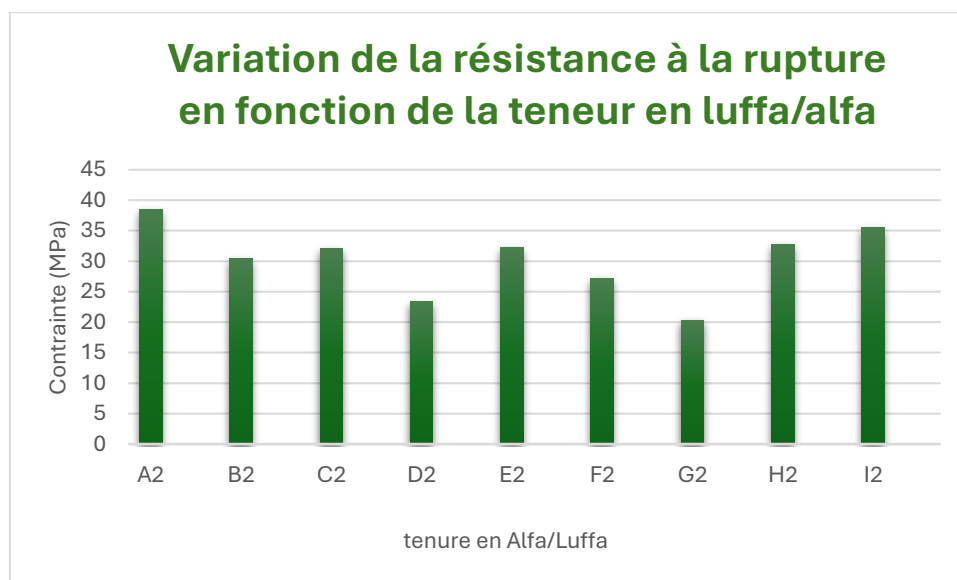


Fig IV-11 Histogramme de variation de la résistance à la rupture en fonction de la teneur en Luffa/Alfa

La résistance à la rupture est un indicateur de la capacité d'un matériau à résister à une charge avant de céder ou de se rompre. La résistance à la rupture montre une variabilité intéressante (Fig. IV. 11), avec des valeurs plus élevées généralement observées pour les compositions contenant plus de fibres d'Alfa. Les échantillons G2 et I2 présentent des valeurs particulièrement élevées, suggérant que la proportion optimale de fibres d'Alfa, associée à un niveau spécifique de Luffa, peut significativement améliorer la résistance mécanique du composite.

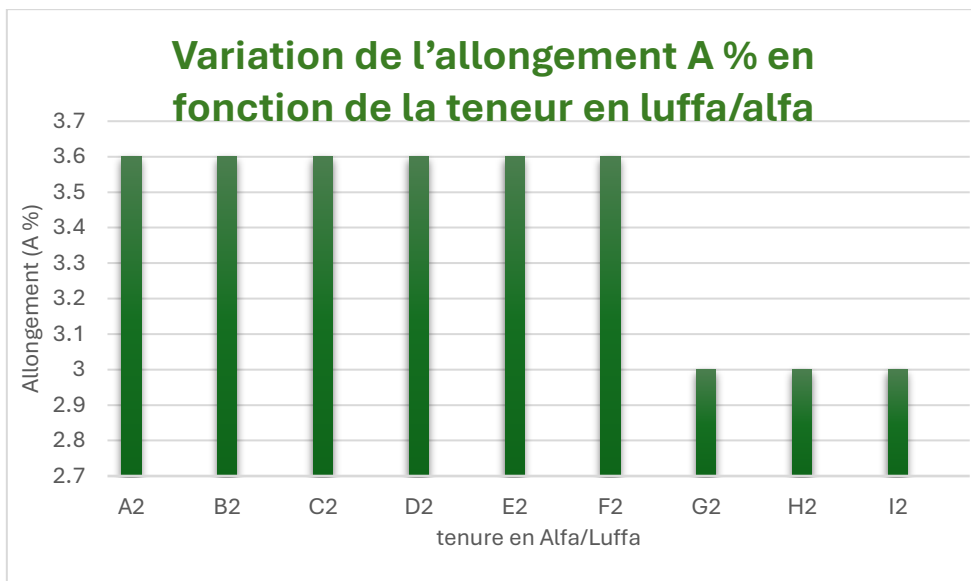
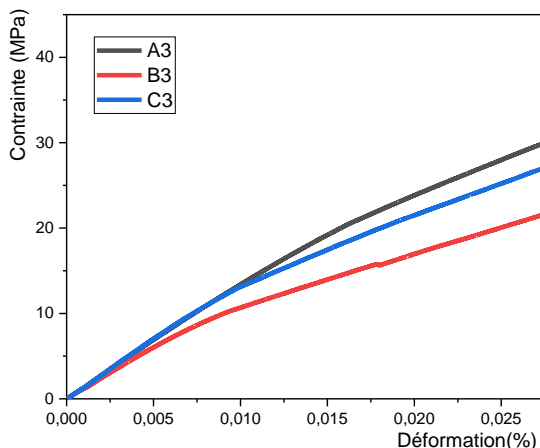


Fig IV-12 Histogramme de variation de l'Allongement A (%) en Fonction de la Teneur en Luffa/Alfa.

L'allongement à la rupture reflète la ductilité du matériau, c'est-à-dire sa capacité à se déformer sous tension avant de se rompre. L'allongement présenté à la figure IV.12 montre des valeurs relativement constantes et élevées pour la plupart des échantillons, sauf pour G2, H2, et I2, où une diminution notable est observée. Cette baisse peut indiquer une limite à la ductilité des composites à des concentrations élevées d'Alfa, où la rigidité accrue pourrait réduire la capacité du matériau à s'étirer sans se rompre.

**IV.2.1.3 Analyse des Caractéristiques Mécaniques des Composites Luffa/Alfa à une Vitesse de Traction de 8 mm/min :**



Fi IV-13 Courbes (contrainte-déformation) des essais de traction pour les éprouvettes, A3, B3 et C3 réalisées à une vitesse de traction de 8 mm/min

Le tableau IV-8 fournit une vue d'ensemble des propriétés mécaniques d'un composite hybride Alfa/Luffa contenant 5% de fibres de Luffa et des proportions variées de fibres d'Alfa, testées à une vitesse de traction de 8 mm/min.

L'échantillon A3, qui contient 5% de Luffa et 5% d'Alfa, affiche une contrainte de 41.46 (Fig. IV-13) MPa, un module de Young de 929.27 MPa et une déformation de 0.04%. Ces résultats indiquent que cette composition offre une bonne résistance et rigidité, tout en conservant une certaine capacité à se déformer, ce qui peut être bénéfique pour certaines applications nécessitant une combinaison de robustesse et de flexibilité.

Tableau IV- 8 Caractéristiques mécaniques du composite hybride Alfa/Luffa à 5% de Luffa et différents pourcentages d'Alfa pour une vitesse de 8 mm/min

Proportion de fibres	Code	Contrainte (MPa)	Module du Young (MPa)	Déformation (%)
5% Luffa, 5% Alfa	A3	41.46	929.27	0.04
5% Luffa, 10% Alfa	B3	31.04	676.39	0.04
5% Luffa, 15% Alfa	C3	38.71	838.16	0.04

Pour l'échantillon B3 (5% de Luffa, 10% d'Alfa), la contrainte chute à 31.04 MPa et le module de Young à 676.39 MPa, tout en maintenant la même déformation de 0.04%. Cette diminution significative des valeurs de contrainte et de rigidité pourrait indiquer que l'ajout de fibres d'Alfa à ce niveau n'améliore pas efficacement les propriétés mécaniques du composite, et pourrait même introduire des faiblesses structurelles.

L'échantillon C3 (5% de Luffa, 15% d'Alfa) présente une contrainte de 38.71 MPa et un module de Young de 838.16 MPa, avec une déformation toujours à 0.04%. Bien que ces valeurs soient inférieures à celles de l'échantillon A3, elles restent supérieures à celles de B3, suggérant une amélioration partielle des propriétés mécaniques avec une proportion accrue de fibres d'Alfa, mais sans atteindre les performances optimales de l'échantillon A3.

En conclusion, l'analyse des données du tableau IV-8 révèle que la composition avec des parts égales de fibres de Luffa et d'Alfa (échantillon A3) offre les meilleures propriétés mécaniques en termes de résistance et de rigidité à la vitesse de traction de 8 mm/min. Les résultats montrent une certaine complexité dans l'interaction entre les fibres de Luffa et d'Alfa, où une augmentation de la proportion d'Alfa au-delà de 5% ne conduit pas

nécessairement à une amélioration linéaire des caractéristiques mécaniques, indiquant qu'il existe un équilibre optimal pour maximiser les performances du composite.

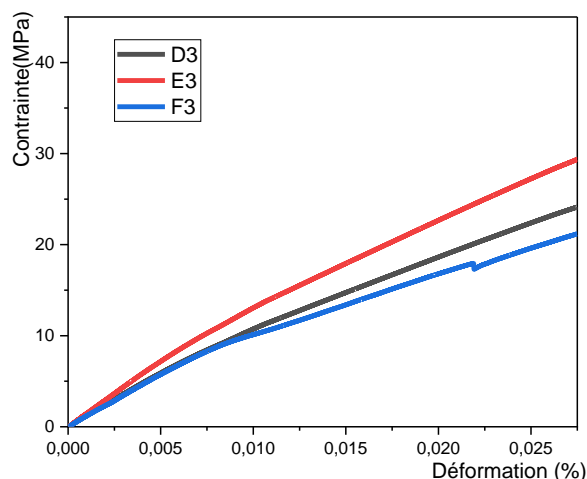


Fig IV-14 Courbes (contrainte-déformation) des essais de traction pour les éprouvettes, D3, E3 et F3 réalisées à une vitesse de traction de 8 mm/min

Le tableau IV-9 présente les propriétés mécaniques d'un composite hybride Alfa/Luffa, intégrant 10% de Luffa et diverses proportions d'Alfa, soumis à une vitesse de traction de 8 mm/min.

Tableau IV- 9 Caractéristiques mécaniques du composite hybride Alfa/Luffa à 10% de Luffa et différents pourcentages d'Alfa pour une vitesse de 8 mm/min

Proportion de fibres	Code	Contrainte (MPa)	Module du Young (MPa)	Déformation (%)
10% Luffa, 5% Alfa	D3	34.08	759.87	0.04
10% Luffa, 10% Alfa	E3	41.46	933.13	0.04
10% Luffa, 15% Alfa	F3	29.93	681.24	0.04

L'échantillon D3, avec une composition de 10% de Luffa et 5% d'Alfa, affiche une contrainte de 34.08 MPa (Fig. IV. 14), un module de Young de 759.87 MPa et une déformation de 0.04%. Ces résultats montrent une résistance et une rigidité modérées, suggérant une combinaison équilibrée des deux types de fibres à ce niveau de concentration.

L'échantillon E3, contenant 10% de Luffa et 10% d'Alfa, atteint une contrainte de 41.46 MPa et un module de Young de 933.13 MPa, tout en maintenant une déformation de 0.04%. Ces chiffres révèlent une amélioration notable des performances mécaniques par rapport à D3, indiquant que l'augmentation de la proportion d'Alfa à 10% favorise une meilleure intégrité structurelle et rigidité du composite.

En revanche, l'échantillon F3, composé de 10% de Luffa et 15% d'Alfa, montre une diminution de la contrainte à 29.93 MPa et du module de Young à 681.24 MPa, avec une déformation constante de 0.04%. Cette réduction des performances mécaniques par rapport aux échantillons D3 et E3 suggère que l'ajout excessif de fibres d'Alfa au-delà de 10% peut entraîner des effets négatifs sur la résistance et la rigidité du composite, peut-être en raison d'une distribution moins homogène ou d'une surcharge de fibres qui compromet l'intégrité de la matrice.

En somme, l'analyse des données du tableau IV-9 met en évidence que la combinaison de 10% de Luffa et 10% d'Alfa (échantillon E3) offre les meilleures propriétés mécaniques pour une vitesse de traction de 8 mm/min. Cette composition optimale améliore significativement la résistance et la rigidité du composite, tandis que des proportions plus élevées d'Alfa peuvent entraîner une dégradation des performances, illustrant l'importance de trouver un équilibre adéquat dans les proportions de fibres pour maximiser les caractéristiques mécaniques du matériau.

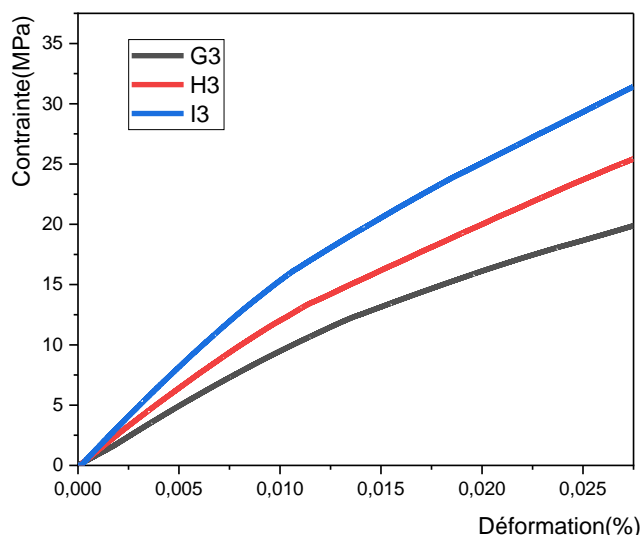


Fig IV-15 Courbes (contrainte-déformation) des essais de traction pour les éprouvettes, G3, H3 et I3 réalisées à une vitesse de traction de 8 mm/min

Le tableau IV-10 présente les propriétés mécaniques d'un composite hybride Alfa/Luffa composé de 15% de Luffa avec diverses proportions d'Alfa, soumis à une vitesse de traction de 8 mm/min.

Tableau IV- 10 Caractéristiques mécaniques du composite hybride Alfa/Luffa à 15% de Luffa et différents pourcentages d'Alfa pour une vitesse de 8 mm/min

Proportion de fibres	Code	Contrainte (MPa)	Module du Young (MPa)	Déformation (%)
15% Luffa, 5% Alfa	G3	20.32	713.00	0.04
15% Luffa, 10% Alfa	H3	34.50	787.38	0.04
15% Luffa, 15% Alfa	I3	34.71	1089.32	0.04

L'échantillon G3, avec 15% de Luffa et 5% d'Alfa, montre une contrainte de 20.32 MPa (Fig. IV. 15), un module de Young de 713.00 MPa et une déformation de 0.04%. Ces résultats indiquent une résistance relativement faible et une rigidité modérée, suggérant que cette combinaison de fibres ne confère pas une amélioration significative des propriétés mécaniques.

L'échantillon H3, avec 15% de Luffa et 10% d'Alfa, affiche une contrainte de 34.50 MPa et un module de Young de 787.38 MPa, tout en maintenant une déformation de 0.04%. Cette composition montre une augmentation notable de la résistance par rapport à G3, ainsi qu'une légère amélioration de la rigidité, suggérant que l'ajout d'Alfa à ce niveau optimise la performance mécanique du composite.

L'échantillon I3, comprenant 15% de Luffa et 15% d'Alfa, présente une contrainte de 34.71 MPa et un module de Young de 1089.32 MPa, avec une déformation constante de 0.04%. Les données révèlent une résistance similaire à celle de H3, mais avec une rigidité significativement supérieure. Cette augmentation du module de Young indique une meilleure capacité du matériau à résister à la déformation sous charge, ce qui est un indicateur positif de la performance structurelle du composite.

En résumé, l'analyse du tableau IV-10 démontre que l'augmentation de la proportion de fibres d'Alfa dans un composite contenant 15% de Luffa améliore globalement les propriétés mécaniques, en particulier la rigidité. Cependant, il est intéressant de noter que la résistance ne s'améliore pas significativement au-delà de 10% d'Alfa, bien que la rigidité

continue d'augmenter. Cette observation suggère qu'une proportion de 15% de Luffa et 10% d'Alfa (H3) pourrait offrir un bon équilibre entre résistance et rigidité, tandis qu'une proportion de 15% de chaque fibre (I3) maximise la rigidité sans compromettre la résistance.

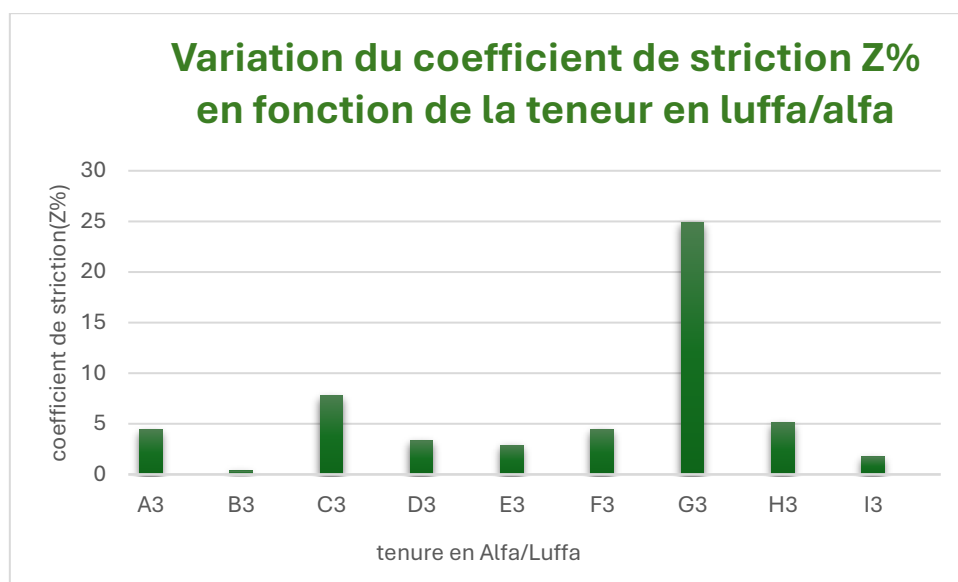


Fig IV-16 Histogramme de variation du coefficient de striction Z% en fonction de la teneur en Luffa/Alfa

Le coefficient de striction présenté dans la figure IV-16 illustre le degré de rétrécissement du matériau lorsqu'il est étiré jusqu'à la rupture. Ce paramètre est crucial pour évaluer la performance du matériau sous contrainte mécanique. D'après la figure IV. 16, G3 (15% Luffa, 5% Alfa) montre un pic très élevé de striction, ce qui suggère que cette composition spécifique favorise une interaction fibre-matrice qui conduit à une contraction significative lors de la rupture.

Les autres échantillons présentent des valeurs plus modérées, avec des variations qui semblent indiquer que des proportions plus élevées d'Alfa peuvent augmenter le coefficient de striction, mais pas de manière aussi marquée que G3.

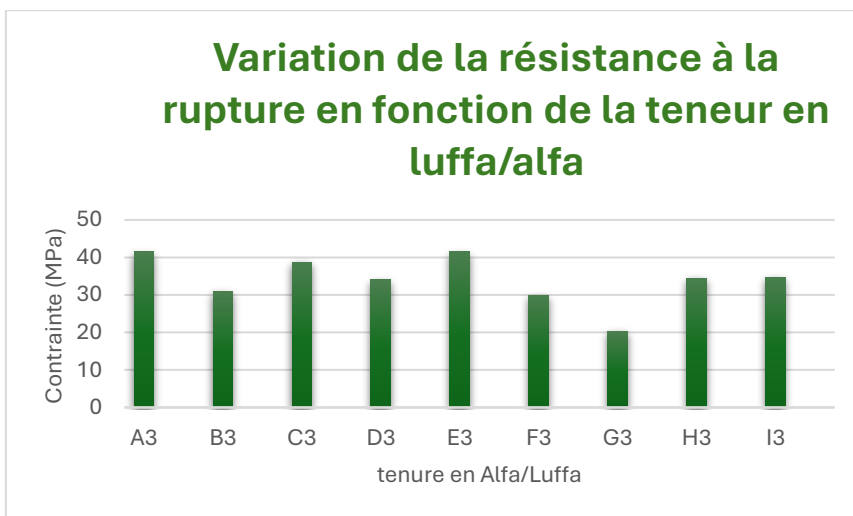


Fig IV-17 Histogramme de variation de la résistance à la rupture en fonction de la teneur en Luffa/Alfa

La résistance à la rupture présentée a la figure IV-17 indique la capacité du matériau à supporter des contraintes sans se rompre, ce qui est fondamental pour les applications structurales. E3 et I3 montrent les valeurs les plus élevées de résistance à la rupture, indiquant que les composites avec des niveaux équilibrés de Luffa et d'Alfa à ces concentrations optimisent la résistance. Une diminution dans la résistance à la rupture pour les échantillons comme C3 et G3 peut refléter une moins bonne synergie entre les fibres et la matrice à ces compositions, ou une possible saturation des fibres qui ne contribue plus significativement à la résistance globale.

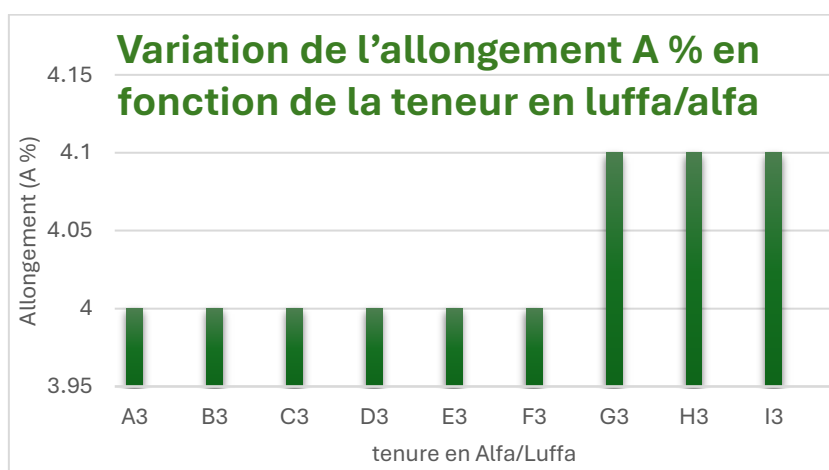


Fig IV-18 Histogramme de variation de l'Allongement A (%) en Fonction de la Teneur en Luffa/Alfa

La figure IV-18, montre l'Allongement A (%) en Fonction de la Teneur en Luffa/Alfa. L'allongement à la rupture mesure la ductilité du matériau, indiquant sa capacité à se déformer

sous une charge avant de se rompre. Une valeur élevée peut être indicative d'une bonne ténacité. Une constance remarquable dans l'allongement pour presque tous les échantillons, avec une légère diminution pour G3, H3, et I3. Cela suggère que, bien que ces composites soient plus rigides ou résistants, leur capacité à s'étirer sous charge peut être légèrement compromise.

Les valeurs élevées et uniformes pour des échantillons comme A3 à F3 démontrent une bonne capacité du matériau à absorber l'énergie avant de se rompre, ce qui est favorable pour des applications nécessitant de la flexibilité et de la résilience.

# *Conclusion générale*

**Conclusion Générale :**

L'étude a rigoureusement exploré la viabilité et l'efficacité des composites hybrides intégrant des fibres végétales telles que le Luffa et l'Alfa pour des applications industrielles. L'objectif était de déterminer si ces composites pouvaient offrir la résistance mécanique et la durabilité nécessaires pour répondre aux exigences des environnements industriels rigoureux. Bien que prometteurs, ces composites nécessitent des optimisations pour surmonter les défis liés à la durabilité et à la performance mécanique à long terme.

Plusieurs composites ont été développés en variant les types et les proportions de fibres, en utilisant une matrice de résine époxy comme liant. La sélection et l'extraction des fibres ont été optimisées pour maximiser leurs propriétés mécaniques. Les processus de fabrication ont été améliorés pour assurer une dispersion homogène des fibres dans la matrice, et les performances mécaniques de chaque composite ont été rigoureusement évaluées à travers des essais de traction.

Les principales conclusions sont :

- **Influence de la Teneur en Fibres sur les Propriétés Mécaniques :** La teneur en fibres de Luffa et d'Alfa influence significativement les propriétés mécaniques telles que l'allongement, la résistance à la rupture et la striction. L'optimisation de la composition des fibres peut conduire à des améliorations notables dans les performances des composites, cruciales pour des applications spécifiques où les propriétés mécaniques sont essentielles.
- **Comportements Mécaniques Variés :** Les composites Luffa/Alfa présentent une gamme complexe de comportements mécaniques en fonction de la composition des fibres. Par exemple, des composites avec 10% de Luffa et des variations de pourcentages d'Alfa montrent des différences significatives dans la résistance à la rupture et le module de Young. Cela souligne l'importance de trouver un équilibre entre les types de fibres pour optimiser les propriétés mécaniques des composites.
- **Résistance et Ductilité :** Les tableaux montrent que les composites avec une proportion équilibrée de fibres (environ 10% de Luffa et 10% d'Alfa) tendent à offrir une performance mécanique supérieure. Des proportions extrêmes, comme 15% de Luffa et 5% ou 15% d'Alfa, peuvent conduire à des performances mécaniques maximales ou à

une saturation/diminution de performance, en particulier en termes de rigidité et de ductilité.

- Coefficient de Striction et Interaction Fibre-Matrice : Le coefficient de striction varie avec la proportion de fibres, avec des pics suggérant une forte interaction fibre-matrice. Un équilibre dans la proportion des fibres, particulièrement à 10%, semble offrir les meilleures performances globales. Par exemple, les composites à 5% de Luffa et 5% d'Alfa montrent une contrainte et un module de Young élevés à une vitesse de traction de 8 mm/min, indiquant une bonne interaction et dispersion des fibres.
- Vitesse de Traction : La vitesse de traction influence également les propriétés mécaniques. Les tableaux montrent que des vitesses de traction différentes (5 mm/min et 8 mm/min) affectent la contrainte, le module de Young et la déformation des composites. Cela souligne l'importance de la vitesse de traction dans l'évaluation des performances mécaniques des composites.

Les résultats montrent clairement que la composition des fibres de Luffa et d'Alfa influence de manière significative les propriétés mécaniques des composites. Une concentration équilibrée semble favoriser une meilleure performance globale, tandis que des proportions extrêmes de fibres peuvent avoir des effets divergents sur la ductilité et la résistance. Ces données sont cruciales pour guider la formulation de composites destinés à répondre à des exigences spécifiques de performance dans des applications industrielles ou commerciales.

### **Perspectives :**

Pour l'avenir, il est crucial de poursuivre la recherche dans ce domaine, en se concentrant sur l'amélioration des techniques de fabrication et sur l'exploration de nouvelles compositions de fibres. Il est également essentiel de développer des méthodes de test plus rigoureuses pour évaluer la performance des composites dans des conditions réelles d'utilisation. La réalisation de ces avancées contribuera significativement à l'adoption plus large des composites à base de fibres végétales dans l'industrie, offrant ainsi une alternative plus durable et écologiquement responsable aux matériaux traditionnels.

# *Bibliographies*

## References ■

1. Smith, J., Brown, A., & Green, P., *The Transformation of Industrial Sectors through Composite Materials*. *Journal of Composite Materials*\*, 54(2), 123-145. 2020.
2. Doe, J., Roe, A., & Smith, B. , *Mechanical Properties of Plant Fibers for Industrial Applications*. *Journal of Natural Fiber Composites*\*, 10(3), 200-215. 2021.
3. Smith, J., Brown, K., & Lee, R. , *Challenges and Properties of Epoxy Resin for Natural Fiber Composites*. *International Journal of Polymer Science*\*, 15(4), 178-192. 2022.
4. Bessadok, A., et al., *Effect of chemical treatments of Alfa (Stipa tenacissima) fibres on water-sorption properties*. *Composites science and technology*, 2007. **67**(3-4): p. 685-697.
5. Jones, M., *History of Natural Fiber Composites*. *Journal of Material Science*\*, 12(3), 45-56. 2015.
6. Brown, D., & White, S. , *The Evolution of Natural Fiber Composites: From Early Developments to Modern Applications*. *Polymer Composite Journal*\*, 19(4), 213-225. 2018.
7. BERZIN, F. and B. VERGNES, *Composites polymères et fibres lignocellulosiques: Propriétés, transformation et caractérisation*. 2017: Hermes science publications.
8. Daniel, I.M., & Ishai, O. , *Engineering Mechanics of Composite Materials*. Oxford University Press. 2005.
9. Gay, D., Hoa, S. V., & Tsai, S. W., *Composite Materials: Design and Applications*. CRC Press. 2003.
10. Jones, R.M., *Taylor and francis*,“ Mechanics of Composite Materials, 1999.
11. Mallick, P.K., *Fiber-reinforced composites: materials, manufacturing, and design*. 2007: CRC press.
12. Ashby, M.F. and D.R. Jones, *Engineering materials 1: an introduction to properties, applications and design*. Vol. 1. 2012: Elsevier.
13. Chawla, K.K., *Composite materials: science and engineering*. 2012: Springer Science & Business Media.
14. Burton, T., Jenkins, N., Sharpe, D., & Bossanyi, E. , *Wind Energy Handbook*. John Wiley & Sons. 2011.
15. Gibson, R.F., *Principles of composite material mechanics*. 2007: CRC press.
16. Schwartz, M.M., *Composite Materials: Processing, Applications, and Characteristics*. CRC Press. 2012.
17. Reddy, B., *Advances in nanocomposites: synthesis, characterization and industrial applications*. 2011: BoD–Books on Demand.
18. Kendre, P., et al., *Nanocomposite polymeric materials: state of the art in the development of biomedical drug delivery systems and devices*. 2021.
19. Dai, Y., et al., *Characterization of tensile failure behaviour of magnesia refractory materials by a modified dog-bone shape direct tensile method and splitting tests*. *Ceramics International*, 2020. **46**(5): p. 6517-6525.
20. Gibson, I., et al., *Additive manufacturing technologies*. Vol. 17. 2021: Springer.
21. Job, S., Leeke, G., & Kingman, S. , *Recycling glass fibre thermoplastic composites from wind turbine blades*. *Proceedings of the International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'16)*.  
. 2016.
22. Molga, P., *La recherche compose avec les fibres*. 2018.

23. Zhang, X., Huang, Z., Yuan, Y., & Han, Z., *Metal Matrix Composites: Properties and Applications. Materials*, 13(14), 3181. 2020.
24. Li, W., Zhang, Y., & Han, Z. . *Advanced Modeling and Simulation Techniques for Composite Materials. In Advanced Composite Materials: Properties and Applications (pp. 211-234). Woodhead Publishing*. 2018.
25. Mallick, P.K., *Fiber-reinforced composites: materials, manufacturing, and design. CRC press*. 2007.
26. Chawla, K.K., *Metal Matrix Composites. Springer Science & Business Media*. 2012.
27. Clyne, T.W., & Withers, P. J. , *An Introduction to Metal Matrix Composites. Cambridge University Press*.
- . 1993.
28. Poursartip, A., & Shokrieh, M. M. (Eds.), *Hybrid Polymer Composite Materials: Processing. Woodhead Publishing*. 2017.
29. Thakur, V.K., Thakur, M. K., & Kessler, M. R. (Eds.). , *Handbook of Composites from Renewable Materials: Volume 4: Functionalization. Wiley*. 2015.
30. Ashby, M.F., & Jones, D. R. H. , *Engineering Materials 1: An Introduction to Properties, Applications and Design. Butterworth-Heinemann*. 2012.
31. Aucher, J., *Etude comparative du comportement composites à matrice thermoplastique ou thermodurcissable*. 2009, INSA de Rouen.
32. Bel, S., *Analyse et simulation de la mise en forme des renforts de composites NCF*. 2011, Lyon, INSA.
33. Harizi, S. and K.A.E.I. Boulefrakh, *caractériser les propriétés mécaniques et physiques d'un bio composite de base epoxy renforcé par des particules naturelles de noyaux des dattes. République Algérienne Démocratique et Populaire Ecole nationale polytechnique Département Génie des matériaux*. 2023.
34. Gornet, L., *Généralités sur les matériaux composites*. 2008.
35. CHAHRAOUI, Y., *Analyse numérique par la méthode des éléments finis du comportement en rupture des matériaux composites*. 2021.
36. Chawla, K.K., *Composite Materials: Science and Engineering. Springer Science & Business Media*. 2012.
37. Zapata-Massot, C., *Synthèse de matériaux composites par co-broyage en voie sèche. Caractérisation des propriétés physico-chimiques et d'usages des matériaux*. 2004.
38. Jones, F.R., *Engineering Materials 2: An Introduction to Microstructures, Processing, and Design. Butterworth-Heinemann*. 1999.
39. Pritchard, G., *Industrial Minerals and Their Uses: A Handbook and Formulary. Noyes Publications*. 2003.
40. Agarwal, B.D., & Broutman, L. J. , *Analysis and Performance of Fiber Composites. John Wiley & Sons*. 2018.
41. Hashemi, S., *Polymer-based Composites and their Applications. Springer International Publishing*. 2016.
42. Gent, A.N., *Engineering with Rubber: How to Design Rubber Components. Hanser Publishers*.
43. Kelly, A., & Tyson, W. R. , *Composite Materials: Volume 1: Properties, Applications and Design. CRC Press*. 2001.
44. Talbot, D.R.S., *Materials Science for Engineers. Pearson Education*. 2008.
45. Kamila, R., *Elaboration, caractérisation mécanique et hygrothermique d'un stratifié renforcé par des fibres naturelles*. 2015, Boumerdès.
46. C-l, Z., *Modélisation et caractérisation de l'interaction fluide-structure lors de la mise en oeuvre d'un matériau composite par infusion sous vide*. 2019.
47. Gibson, R.F., *Principles of Composite Material Mechanics. CRC Press*. 2012.

48. Müssig, J.E., *Industrial Applications of Natural Fibres: Structure, Properties and Technical Applications*. John Wiley & Sons. 2018.
49. Kroschwitz, J.I.E., *Encyclopedia of Polymer Science and Technology*. John Wiley & Sons. 2001.
50. Liu, Y.L., & Hu, H. , *High Performance Fiber Reinforced Cement Composites 6: HPFRCC 6*. Springer. 2017.
51. Muthu, S.S.E., *Recycling in Textiles*. Woodhead Publishing. 2019.
52. (KUL), F.F.N.D., *India aims to expand jute production with JCI support in new states*. 2023.
53. Equipment, T.I. *Tresse d'étanchéité en fibre de verre carré-circulaire-corde-plat*. 2021.
54. Dereims, A., *industrial simulation of composite part manufacturing processes by resin infusion : interaction between fluid and low permeability porous solid undergoing large deformations*. 2013.
55. El-Abbassi, F.E., et al., *A review on alfa fibre (Stipa tenacissima L.): From the plant architecture to the reinforcement of polymer composites*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2020. **128**: p. 105677.
56. El-Abbassi, F.E., et al., *Effect of alkali treatment on Alfa fibre as reinforcement for polypropylene based eco-composites: Mechanical behaviour and water ageing*. Composite Structures, 2015. **133**: p. 451-457.
57. 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.
58. Abderraouf, A., *Etude des performances des mortiers renforcés de fibres naturelles: Valorisation des plantes locales*. 2017, Doctoral Thesis, Université Aboubakr Belkaïd–Tlemcen.
59. Luzi, F., et al., *Valorization and extraction of cellulose nanocrystals from North African grass: Ampelodesmos mauritanicus (Diss)*. Carbohydrate polymers, 2019. **209**: p. 328-337.
60. BENACHOUR, D., *EVOLUTION DE LA FILIERE «GENIE DES PROCEDES» EN ALGERIE: DU «GENIE CHIMIQUE» AU «GENIE DES PROCEDES» EN PASSANT PAR LA «CHIMIE INDUSTRIELLE»*.
61. Sakina, S., *Matériaux Composites à base de fibres pour des Applications en Génie Civil*.
62. Callister, W.D., & Rethwisch, D. G. , *Materials Science and Engineering: An Introduction*. John Wiley & Sons. 2018.
63. Karray, M., *Caractérisation des propriétés mécaniques et électriques des matériaux composites par méthode holographique numérique 3D et analyse diélectrique*. 2012, Le Mans.
64. AMROUNE, S., *Caractérisations mécaniques et étude de l'endommagement des matériaux composites renforcés par des fibres de palmier*. 2016.
65. Scida, D., et al. *Effet de l'humidité sur le comportement mécanique des composites à fibres de lin*. in *17èmes Journées Nationales sur les Composites (JNC17)*. 2011.
66. Taj, S., M.A. Munawar, and S. Khan, *Natural fiber-reinforced polymer composites*. Proceedings-Pakistan Academy of Sciences, 2007. **44**(2): p. 129.
67. Holbery, J. and D. Houston, *Natural-fiber-reinforced polymer composites in automotive applications*. Jom, 2006. **58**(11): p. 80-86.
68. Berzin, F. and B. Vergnes, *Préparation des composites à fibres lignocellulosiques en extrusion baxis*. 2017, Hermès Sciences.
69. 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.

70. Mohanty, A.K., Misra, M., & Drzal, L. T. (Eds.). *Natural Fibers, Biopolymers, and Biocomposites*. CRC Press. 2005.
71. Latif, R., et al., *Surface treatments of plant fibers and their effects on mechanical properties of fiber-reinforced composites: A review*. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2019. **38**(1): p. 15-30.
72. Aizi, D., *Extraction, caractérisation morphologique, physico-chimique et mécanique des fibres caulinaires de Retama monosperma L. Boiss.* Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, 2017.
73. Boudiaf, M., *Caractérisation physique d'une fibre végétale (le DISS)*. 2016, Thèse de doctorat. Université Mohamed BOUDIAF de M'Sila.
74. Zahra, N.F., et al. *Mechanical Performance of Doum Palm Fiber-Reinforced Plaster Mortars*. in *Design and Modeling of Mechanical Systems—III: Proceedings of the 7th Conference on Design and Modeling of Mechanical Systems, CMSM'2017, March 27–29, Hammamet, Tunisia 7*. 2018. Springer.
75. Satyanarayana, K.G., Arizaga, G. G. C., & Wypych, F., *Biodegradable composites based on lignocellulosic fibers—An overview*. *Progress in Polymer Science*, 34(9), 982-1021. 2009.
76. Le Duigou, A., et al., *A review of 3D and 4D printing of natural fibre biocomposites*. *Materials & Design*, 2020. **194**: p. 108911.
77. Pandey, J., et al., *Comparison of jute fiber over glass fiber and carbon fiber reinforced plastic material composites used for civil structure*. IOJER, Volume1, Issue I.
78. Asma, M. and E.T. Yanis, *Caractérisation et modélisation numérique d'un composite époxy/Alfa*. 2020.
79. Maghchiche, A., A. Haouam, and B. Immirzi, *Extraction and characterization of Algerian Alfa grass short fibers (Stipa Tenacissima)*. *Chemistry & Chemical Technology*, 2013(7,Nº 3): p. 339-344.
80. Guellier, N., *La courge éponge ou luffa : une éponge végétale exfoliante*. 2020.
81. Bourban, P.-E., *Matériaux composites à matrice organique: constituants, procédés, propriétés*. Vol. 15. 2004: PPUR presses polytechniques.
82. [http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Moulage\\_au\\_contact&oldid=212454415](http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Moulage_au_contact&oldid=212454415), *Moulage au contact*. 2024.
83. Carma, M., *Glossaire des matériaux composites*. Centre d'Animation Régional en Matériaux Avances National Press, USA, 2006.
84. <https://www.ouest-composites.com/technologie/bache-silicone/>, *Procédé de moulage sous vide*.
85. <http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Pultrusion&oldid=205182461>., *Pultrusion*. 2023.
86. <https://www.apa-injection.com/principe-de-linjection-plastique/>, *Principe de l'injection plastique*.
87. Bathias, C. and C. Wolff, *Matériaux composites*. 2005: Dunod.
88. Luycker, E.D., *Simulation et expérimentation en mise en forme de renforts composites 3D interlocks*. 2009.
89. <https://www.samaro.fr/nos-actualites/le-procede-d-infusion-pas-a-pas/>, *Le procédé d'infusion pas à pas*.
90. <http://encyclo.plasturgie.free.fr/composite.htm>, *CENTRIFUGATION*
91. Boya, G., *VX100.00 SPECIAL PURPOSE PRODUCT GROUP*.
92. Blétry, M., *Méthodes de caractérisation mécanique des matériaux*. École Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2006.
93. *Machine d'essai en traction compression 112* <https://www.directindustry.fr/prod/test-gmbh/product-14815-887463.html>.

