



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



Département de Technologie

Filière : Génie civil

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de de professeur de
l'enseignement secondaire technique

Thème :

**Effet des fibres courtes d'Alfa sur le comportement
Physico-mécanique des composites polyesters/ Alfa
traîtée et non traitée**

Présenté par : Achichi Zakaria – Bensalah Mohamed – Bouhadedf Hichem

Jury de Soutenance :

Nom et prénom	Grade	Université	Rôle
Dob Hannane	MCB	Ecole Normale Supérieure de l'Enseignement Technologique-Skikda	Président
Kersenna Soumaya	MCB	Université Badji Mokhtar-Annaba	Encadrant
Biskri Yasmina	MCA	Ecole Normale Supérieure de l'Enseignement Technologique-Skikda	Co- Encadrant
Mirouzi Ghania	MCA	Ecole Normale Supérieure de l'Enseignement Technologique-Skikda	Examineur

Année Universitaire : 2023/2024

Remerciements

Tout d'abord, nous tenons à remercier Allah, le Clément et le Miséricordieux, de nous avoir donné la force et le courage de mener à bien ce modeste travail.

Nous souhaitons exprimer notre profonde gratitude à Docteure Kersenna Soumaya et Biskri Yasmina, qui ont encadré cette mémoire. Leur soutien constant, leur disponibilité, leurs conseils avisés et leur assistance précieuse ont été inestimables. Nous les remercions également pour les nombreuses heures consacrées à la lecture et aux corrections du manuscrit.

Nous tenons à exprimer toute notre gratitude aux membres du jury. En particulier, nous remercions Madame Dob Hannane, Maître de Conférences de classe B, pour avoir accepté de présider notre jury de soutenance, ainsi que Madame Mirouzi Ghania, Maître de Conférences de classe A, pour avoir accepté d'examiner ce mémoire.

Nous remercions également Monsieur RAHMOUNI SALIH, chef du département de technologie de l'ENSET SKIKDA, pour sa disponibilité.

Nos remerciements s'adressent aussi à tous les membres des laboratoires K-Plast et C-Plaste et Polymède, ainsi qu'aux ingénieurs et personnels administratifs avec qui nous avons eu le plaisir de travailler.

Nous exprimons notre profonde reconnaissance à tous ceux et celles qui, de près ou de loin, nous ont apporté aide et encouragement. Qu'ils trouvent ici l'expression de notre sincère gratitude.

Enfin, nous dédions ce travail à nos parents et à toute notre famille, qui nous ont toujours soutenus et encouragés dans nos choix d'études et personnels.

Résumé

Durant ces dernières années, les composites à base de fibres naturelles suscitent beaucoup d'intérêt pour au moins deux raisons essentielles. Premièrement, ils contribuent à la protection de l'environnement. Deuxièmement, ils permettent de valoriser les matières naturelles renouvelables en remplacement des fibres synthétiques telles que les fibres d'aramide, de carbone ou de verre. L'objectif de cette mémoire est d'étudier l'effet du traitement d'une charge végétale (la fibre d'Alfa) sur le comportement des matériaux bio-composites constitués d'une matrice thermodurcissable à base de résine polyester insaturée. Cependant, les fibres d'Alfa font ici l'objet de travaux particuliers en raison de leur disponibilité et dans le but de les valoriser. Un traitement de surface en l'occurrence le traitement combiné par l'hydroxyde de sodium (NaOH) et l'acide acétique (CH₃COOH) est réalisé pour améliorer les propriétés mécaniques des fibres d'Alfa. L'influence du traitement alcalin sur la morphologie des fibres a été analysée. Des analyses par FTIR ont révélé des changements physico-chimiques sur les surfaces des fibres d'Alfa traitées. Les composites ont été préparés par le procédé de moulage au contact. Les plaques de composites ont été durcies pendant 24 heures à température ambiante, puis mises en étuve pendant 17 heures à 45°C pour subir une post-cuisson. L'étude des propriétés mécaniques, effectuée en déterminant la contrainte à la rupture, la déformation à la rupture et la résistance à l'impact, a montré que ces propriétés augmentent jusqu'à une teneur de 15pcr en raison de la forte affinité entre les deux composants après le traitement des fibres d'Alfa par (NaOH+CH₃COOH). Ce traitement a réduit le caractère hydrophile des fibres et permis une bonne dispersion de la charge. Au-delà de cette teneur, les propriétés diminuent, probablement en raison d'une dispersion inadéquate et de la formation d'agglomérations, qui peuvent initier des ruptures.

Mots clés : Matériaux Composite ; Fibre d'Alfa ; Résine ; Traitement chimique.

Abstract

In recent years, natural fibre composites have garnered significant interest for two primary reasons. Firstly, they contribute to environmental protection. Secondly, they enable the use of renewable natural materials as substitutes for synthetic fibres like aramid, carbon, and glass. The aim of this thesis is to study the effect of treating a plant filler (Alfa fibre) on the behaviour of bio-composite materials consisting of a thermosetting matrix made of unsaturated polyester resin. However, Alfa fibres are the subject of particular research here due to their availability and the aim of enhancing their value. A surface treatment, specifically a combined treatment with sodium hydroxide (NaOH) and acetic acid (CH₃COOH), was performed to enhance the mechanical properties of the Alfa fibres. The influence of the alkaline treatment on fibre morphology was analysed. FTIR analysis revealed physico-chemical changes on the surfaces of the treated Alfa fibres. The composites were prepared using the contact moulding process. The composite sheets were cured for 24 hours at room temperature, and then placed in an oven for 17 hours at 45°C for post-curing. The analysis of mechanical properties, conducted by assessing stress at break, strain at break, and impact resistance, revealed that these properties increased up to a content of 15pcr by weight of composite reinforcement, owing to the enhanced affinity between the two components subsequent to the treatment of Alfa fibers with (NaOH+CH₃COOH). This treatment mitigated the hydrophilic nature of the fibres and facilitated effective filler dispersion. Beyond this threshold, the properties declined, likely due to insufficient dispersion and the formation of agglomerates, which could initiate breakage.

Key words: Composite materials; Alfa fibre; Resin; Chemical treatment.

ملخص

في السنوات الأخيرة، شهدت المواد المركبة المعتمدة على الألياف الطبيعية اهتمامًا متزايدًا لسببين رئيسيين على الأقل. أولاً، تسهم في حماية البيئة. وثانياً، تمكّن من استخدام المواد الطبيعية المتجددة بدلاً من الألياف الاصطناعية مثل ألياف الأراميد، وألياف الكربون، والألياف الزجاجية.

هدف هذه المدكرة هو دراسة تأثير معالجة الحشو النباتي (ألياف الألفا) على سلوك المواد المركبة الحيوية المكونة من مصفوفة البوليستر غير المشبعة.

يتم في هذه الحالة إجراء معالجة سطحية مشتركة باستخدام هيدروكسيد الصوديوم (NaOH) وحمض الأسيتيك (CH_3COOH) لتحسين الخواص الميكانيكية لألياف الألفا. تم تحليل تأثير المعالجة القلوية على مورفولوجيا الألياف. أظهر تحليل FTIR تغيرات فيزيائية وكيميائية على سطوح ألياف الألفا بعد المعالجة. تم تحضير المركبات باستخدام عملية الصب التلامسي. تمت معالجة الألواح المركبة لمدة 24 ساعة عند درجة حرارة الغرفة، ثم وضعها في الفرن لمدة 17 ساعة عند 45 درجة مئوية لإجراء المعالجة اللاحقة.

أظهرت دراسة الخواص الميكانيكية، التي تمت عبر تحديد الإجهاد عند الكسر والانفعال عند الكسر ومقاومة الصدمات، أن هذه الخواص تتحسن حتى وصول محتوى الحشو إلى 15pcr من وزن المركب بفضل التقارب القوي بين المكونين بعد معالجة ألياف الألفا باستخدام ($\text{NaOH}+\text{CH}_3\text{COOH}$). هذا العلاج أدى إلى تقليل الطبيعة المحبة للماء للألياف وتمكين نشنت فعال للحشو. ولكن فوق هذا المستوى، تنخفض الخواص، ربما بسبب عدم كفاية التثنت وتكوين التجمعات، التي يمكن أن تؤدي إلى حدوث التمزقات.

الكلمات الرئيسية: المواد المركبة؛ ألياف ألفا؛ مادة صمغية؛ المعالجة الكيميائية.

Sommaire

Remerciements	i
Résumé	ii
Abstract	iii
ملخص	iv
Listes des figures	viii
Listes des tableaux	ix
Introduction générale.....	2
Chapitre I : Généralités sur les matériaux composites	3
I.1. Introduction	4
I.2. Définition des matériaux composites	4
I.2.1. Les propriétés des matériaux composites	4
I.2.2. Exemples de matériaux composites	5
I.3. Classification des matériaux composites.....	5
I.3.1. Classification suivant la forme des constituants	6
I.3.2. Classification suivant la nature des constituants.....	6
I.4. Composants	7
I.4.1. Renforts.....	7
I.4.2. Matrice	12
I.4.3. Additifs	15
I.5. Matériaux composites structuraux.....	15
I.5.1. Le monocouche	15
I.5.2. Le stratifiés.....	15
I.5.3. Sandwichs	16
I.6. Technologie de la mise en œuvre	16
I.7. Avantage et inconvénients des matériaux composites	19
I.7.1. Les Avantages.....	19
I.7.2. Les inconvénients.....	19
I.8. Domaine d'utilisation des matériaux composites	19
I.9. Conclusion	20
Chapitre II : Etude des fibres naturelles végétales	21
II.1. Introduction	22
II.2. Historique	22
II.3. Fibres naturelles.....	23
II.3.1. Définition de la fibre végétale.....	24
II.3.2. Classification des fibres végétales	25

II.3.3. Structure et morphologie des fibres naturelles.....	26
II.3.4. Propriétés mécaniques des fibres naturelles	28
II.4. Paramètres influençant les propriétés des fibres végétales.....	29
II.5. Présentations des différentes fibres végétales	30
II.5.1. Alfa	30
II.5.2. Sisal.....	31
II.5.3. Jute.....	33
II.6. Méthodes d'extraction des fibres.....	35
II.6.1. Les prétraitements.....	35
II.6.2. L'extraction mécanique	35
II.6.3. L'extraction chimique.....	35
II.6.4. L'extraction biologique.....	36
II.7. Utilisation des fibres végétales : avantages et inconvénients	37
II.7.1. Avantage	37
II.7.2. Inconvénients	37
II.8. Conclusion.....	38
Chapitre III : Matériaux utilisés et techniques expérimentales	39
III.1. Introduction	40
III.2. Matériaux utilisés	40
III.2.1. Résine polyester insaturé	40
III.2.2. Système catalytique catalyseur/accélérateur	40
III.2.3. Fibres d'Alfa	40
III.2.4. Produit chimique utilisés.....	41
III.3. Elaboration de composites à matrice UPR	42
III.3.1. Protocole de traitement des fibres.....	42
III.3.2. Composites UPR/fibres Alfa traité et no traité	43
III.4. Techniques expérimentales.....	44
III.4.1. Préparation des échantillons et essais de caractérisation	44
III.4.2. Essais mécaniques.....	44
□ Protocole expérimental pour le calcul de la résilience Izod	46
□ Protocole expérimental	47
III.4.3. Essais physiques.....	47
III.4.4. Spectroscopie Infra Rouge à Transformée de Fourier (FTIR).....	49
III.5. Conclusion.....	49
Chapitre IV : Résultats et discussion.....	50
IV.1. Introduction	51
IV.2. Analyse de spectroscopie infrarouge	51

IV.3. Caractérisation mécanique.....	53
IV.3.1.Essai de traction.....	53
IV.3.2.Résultats de l'essai de choc	57
□ Traitement par NaOH+CH ₃ COOH.....	57
IV.3.3.Test de la dureté Shore D.....	58
IV.4. Caractérisation physique.....	58
IV.4.1.Test de densité	58
IV.4.2.Absorption d'eau	59
IV.5. Conclusion.....	60
Conclusion générale et perspectives	62
Références bibliographiques	65

Listes des figures

Figure I. 1: Schéma représentatif des matériaux composites	5
Figure I. 2: Les différents types de renforts de base	8
Figure I. 3 : Les fibres Unidirectionnelles.....	11
Figure I. 4 : Les fibres Multidirectionnelles aléatoires	11
Figure I. 5 : Les fibres Multidirectionnelles tissées	12
Figure I. 6: Les Classification des matrices	12
Figure I. 7: Composites stratifiées	16
Figure I. 8: Composite sandwichs	16
Figure II. 1: Classification des fibres naturelles.....	23
Figure II. 2: Fibres végétales (alfa).....	23
Figure II. 3: Les fibres animales (la laine).....	24
Figure II. 4: La fibre de carbone.....	24
Figure II. 5: Structure d'une micro fibrille de cellulose.....	27
Figure II. 6: Structure d'une fibre élémentaire végétale	28
Figure II. 7 : Propriétés mécaniques des fibres naturelles comparées aux renforts	29
Figure II. 8 : La plante et les fibres l'Alfa	30
Figure II. 9: plante de sisal.....	32
Figure II. 10: Jute (plant).....	33
Figure II. 11 : Fibres de jute.....	34
Figure II. 12: Fibres de jute.....	34
Figure III. 1: Fibre d'Alfa.....	41
Figure III. 2: Organigramme de traitement des fibres d'Alfa.....	42
Figure III. 3 : Découpage les fibres d'Alfa en longueur de 3mm.....	43
Figure III. 4: Moule en bois utilisé durant l'élaboration.....	43
Figure III. 5: Etapes de préparation des composites.....	44
Figure III. 6: Dispositif d'essai de traction.....	45
Figure III. 7: Éprouvettes utilisées en traction.....	45
Figure III. 8 : Appareillage pour le calcul de la résilience selon l'essai IZOD.....	46
Figure III. 9: a- Eprouvette avant le test. b- Eprouvette après le test.....	46
Figure III. 10: Appareillage de mesure de la dureté Shore D.....	47
Figure III. 11 : Mesure de la densité.....	48
Figure III. 12 : Mesure de l'absorption d'eau.....	48
Figure III. 13: Spectrophotomètre à transformée de Fourier de type Perkin Elmer FT-IR spectromètre.....	49

Listes des tableaux

Tableau II. 1: Composition chimique d'Alfa	31
Tableau II. 2: Composition chimiques de la fibre de jute a l'état naturel pourcentage en poids... 34	34
Tableau II. 3: Caractéristiques physiques de la fibre de jute à l'état nature	34
Tableau III. 2: Caractéristiques générales de la résine polyester insaturé.	40
Tableau III. 3: Les produits utilisés.....	41



INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

Introduction générale

Un matériau composite se compose de plusieurs éléments distincts, désignés sous les noms de renfort et de matrice. Ces deux composants sont étroitement liés dans un matériau composite intact, ce qui prévient tout glissement ou séparation entre eux. Dans les matériaux composites, les renforts, qu'ils soient sous forme de fibres continues ou discontinues, assurent la résistance mécanique, tandis que la matrice agit comme un liant entre les fibres, garantissant une répartition uniforme des contraintes mécaniques. L'agencement et l'orientation des fibres exercent une influence significative sur les propriétés mécaniques de la structure. Notre étude se concentre spécifiquement sur les matériaux composites à renfort de fibres courtes, notamment les fibres d'alfa. Cependant, les matériaux composites à renfort de fibres sont largement utilisés dans divers secteurs tels que l'industrie nautique, automobile, aéronautique et spatiale. La fabrication des pièces structurelles implique l'empilement de couches de fibres, optimisant ainsi l'orientation des renforts en fonction des charges prévues. Le choix de la résine et du renfort dépend de l'application finale envisagée.

En outre, les fibres naturelles végétales représentent une alternative durable et prometteuse dans le domaine des matériaux composites. Leur substitution aux fibres synthétiques dérivées de ressources non renouvelables et polluantes présente un avantage environnemental considérable. En fait, des fibres naturelles végétales telles que l'alfa, le lin, le jute, le sisal, le bambou et le chanvre gagnent en popularité dans l'industrie des composites, stimulant ainsi des investissements importants dans la production agricole de ces fibres. En plus, l'utilisation croissante des fibres végétales est en plein essor, grâce à leurs propriétés spécifiques intéressantes, leur faible densité et leur biodégradabilité, ce qui en fait des candidates idéales pour le développement de matériaux innovants. Ces nouveaux composites ont enregistré une croissance remarquable ces dernières années. Par ailleurs, la résine polyester insaturé, notamment la résine isophthalique de la firme ExxonMobil Chemical, sous forme de mélange peu visqueux, a été utilisée comme matrice dans notre étude.

L'objectif de ce travail est d'étudier l'effet des fibres courtes d'alfa sur le comportement mécanique et physique des composites polyester/alfa traités et non traités.

Ce travail est organisé en quatre chapitres :

Le premier chapitre introduit les matériaux composites, leurs différents types, leurs utilisations et leurs principaux avantages.

Le deuxième chapitre est dédié aux fibres végétales, leur classification, leur composition, leurs propriétés ainsi que leurs principaux avantages et inconvénients.

Le troisième chapitre présente les matériaux utilisés et explique la technique expérimentale pour élaborer les composites.

Enfin, le dernier chapitre se concentre sur les résultats des tests et leur analyse, concluant par une synthèse générale.

Chapitre I : Généralités sur les matériaux composites

Chapitre I : Généralités sur les matériaux composites

I.1. Introduction

Les matériaux composites sont formés de deux phases distinctes : le renfort et la matrice. Le renfort confère au matériau sa résistance mécanique, tandis que la matrice assure la cohésion entre les fibres et distribue les contraintes. On distingue deux types de renforts : continus et discontinus. Les renforts continus présentent une résistance mécanique supérieure, mais leur fabrication est plus complexe que celle des renforts discontinus.

La matrice peut être composée de divers matériaux, tels que les résines thermoplastiques, les résines thermodurcissables ou les polymères. Le choix de la matrice dépend des propriétés mécaniques recherchées pour le matériau composite. Ces matériaux composites sont largement utilisés dans divers secteurs tels que l'industrie aéronautique, automobile, maritime et spatiale. Ils présentent de nombreux avantages par rapport aux matériaux traditionnels, tels que la légèreté, la résistance, la durabilité et la résistance à la corrosion.

L'utilisation croissante de fibres naturelles dans les matériaux composites constitue une tendance notable. Les fibres naturelles présentent divers avantages par rapport à leurs homologues synthétiques, tels que leur faible densité, leur caractère biodégradable et leur coût plus abordable. Le béton polymère, une variété de matériau composite dont le liant est constituée d'un polymère, offre de nombreux avantages comparativement au béton traditionnel, notamment en termes de légèreté, de résistance à la corrosion et de durabilité [1].

I.2. Définition des matériaux composites

Les matériaux composites sont des matériaux hybrides, formés par la combinaison de deux ou plusieurs matériaux de natures différentes. L'objectif de cette combinaison est d'obtenir des propriétés spécifiques qui surpassent celles des matériaux monomatériaux. Ces composites se composent de deux phases distinctes :

- La phase discontinue, également appelée renfort, est responsable des propriétés mécaniques du matériau composite. Elle est généralement constituée de fibres, de particules ou de lamelles.
- La phase continue, appelée matrice, assure la cohésion et la tenue en forme du matériau. Elle est généralement composée d'un plastique, d'un métal ou d'une céramique.

Cette combinaison de renfort et de matrice confère aux matériaux composites des avantages significatifs, les rendant adaptés à diverses applications industrielles.

I.2.1. Les propriétés des matériaux composites

Les propriétés des matériaux composites sont influencées par la nature et l'arrangement des différents composants. En règle générale, les propriétés mécaniques des composites surpassent celles des matériaux monomatériaux. Ces matériaux se distinguent par leur légèreté, leur résistance accrue et leur durabilité supérieure par rapport aux matériaux traditionnels.

Les composites jouent un rôle crucial dans divers secteurs tels que l'aéronautique, l'automobile, la construction et la marine. Leur utilisation permet la fabrication de pièces plus légères, plus résistantes et

Chapitre I : Généralités sur les matériaux composites

plus durables par rapport aux pièces traditionnelles. Cette adaptabilité des composites à répondre à des exigences spécifiques les rend essentiels pour la conception de structures et de composants dans des environnements exigeants [1].

I.2.2. Exemples de matériaux composites

Voici quelques exemples de matériaux composites (Figure.I.1) :

- Les composites à base de fibres de carbone sont employés dans l'industrie aéronautique pour la fabrication de fuselages, d'ailes et d'hélices en raison de leur légèreté exceptionnelle et de leur grande résistance.
- Les composites à base de fibres de verre sont couramment utilisés dans le domaine de la construction pour la fabrication de panneaux, de poutres et de colonnes en raison de leur résistance et de leur durabilité.
- Les composites à matrice métallique sont employés dans l'industrie automobile pour la fabrication de pièces de carrosserie, de châssis et de moteurs en raison de leur résistance et de leur durabilité [2].

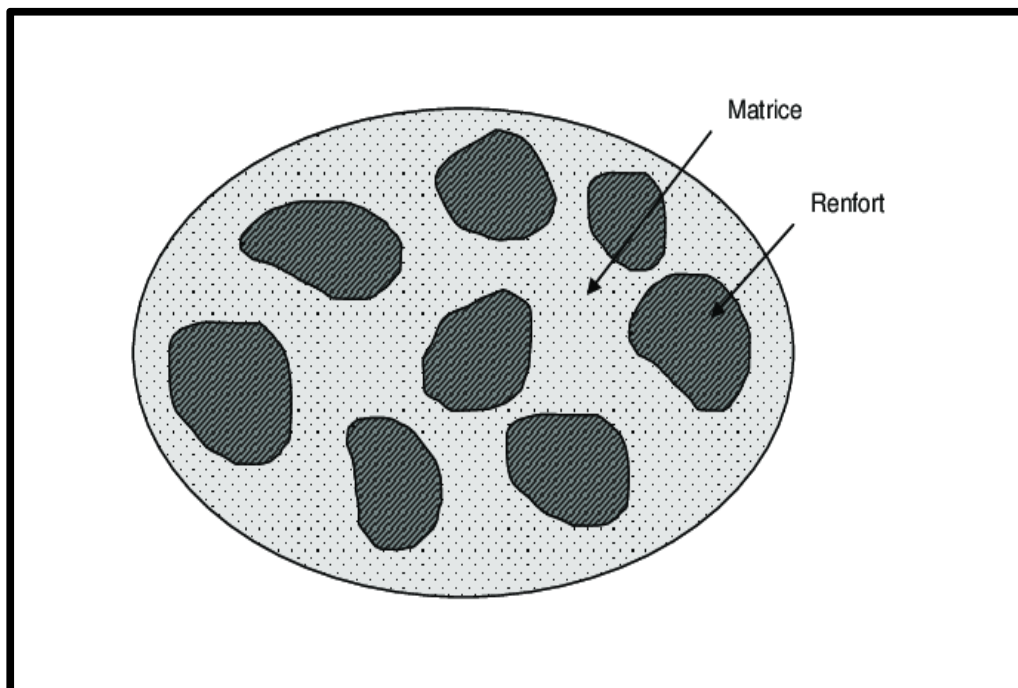


Figure I. 1: Schéma représentatif des matériaux composites [2].

I.3. Classification des matériaux composites

La description d'un matériau composite implique la spécification de trois paramètres fondamentaux :

- ❖ La nature des constituants et leurs propriétés.
- ❖ La géométrie du renfort, y compris sa distribution.
- ❖ La nature de l'interface entre la matrice et le renfort.

Chapitre I : Généralités sur les matériaux composites

La caractérisation de la géométrie du renfort inclura des aspects tels que sa forme, sa taille, la concentration du renfort, sa disposition, etc [3].

I.3.1. Classification suivant la forme des constituants

En fonction de la forme de leurs constituants, les composites sont classés en deux grandes catégories :

- ❖ Les matériaux composites à particules.
- ❖ Les matériaux composites à fibres.

I.3.1.1. Composites à fibres

Un matériau composite est catégorisé comme un composite à fibres lorsque le renfort se présente sous forme de fibres. Ces fibres peuvent adopter deux formes : soit en fibres continues, soit en fibres discontinues telles que les fibres coupées ou les fibres courtes. La disposition et l'orientation des fibres offrent une flexibilité permettant de personnaliser les propriétés mécaniques des matériaux composites. Ainsi, il est possible d'obtenir des matériaux allant de fortement anisotropes à isotropes dans un plan donné. Le concepteur dispose ainsi d'un type de matériau lui permettant de modifier et d'ajuster à sa guise les comportements mécaniques et physiques en agissant sur :

- ❖ La nature des constituants.
- ❖ La proportion des constituants.
- ❖ L'orientation des fibres conformément aux exigences du cahier des charges. L'importance des matériaux composites à fibres justifie une étude approfondie de leurs comportements mécaniques [3].

I.3.1.2. Composites à particules

Un matériau composite est classé comme un composite à particules lorsque le renfort se présente sous forme de particules. À la différence des fibres, une particule n'a pas de dimension privilégiée. Les particules sont couramment employées pour améliorer certaines propriétés des matériaux ou des matrices, telles que la rigidité, la résistance à la température, la résistance à l'abrasion, la réduction du retrait, etc. Dans de nombreux cas, les particules servent simplement de charges pour réduire le coût du matériau, sans compromettre ses caractéristiques. Le choix de l'association matrice-particules dépend des propriétés spécifiques recherchées [4].

I.3.2. Classification suivant la nature des constituants

En fonction de la nature de la matrice, les matériaux composites sont classés en composites à matrice organique, à matrice métallique ou à matrice minérale. Différents renforts sont associés à ces matrices. Actuellement, seuls certains couples d'associations sont largement utilisés dans l'industrie, tandis que d'autres font l'objet de développements dans les laboratoires de recherche. Parmi ces composites, citons : [3-4].

A. Composites à matrice organique (résine, charges), comprenant :

- des fibres minérales telles que le verre, le carbone, etc ;
- des fibres organiques comme le Kevlar, les polyamides, etc ;

Chapitre I : Généralités sur les matériaux composites

— des fibres métalliques incluant le bore, l'aluminium, etc.

B. Composites à matrice métallique (alliages légers et ultralégers d'aluminium, de magnésium, de titane), comprenant :

— des fibres minérales telles que le carbone, le carbure de silicium (sic) ;

— des fibres métalliques comme le bore ;

— des fibres métallo-minérales telles que les fibres de bore revêtues de carbure de Silicium (borsic).

C. Composites à matrice minérale (céramique), comprenant :

— des fibres métalliques telles que le bore ;

— des particules métalliques appelées cermets ;

— des particules minérales telles que les carbures, les nitrures, etc.

Les matériaux composites à matrice organique sont généralement limités à des applications dans des plages de température ne dépassant pas 200 à 300 °C. En revanche, les matériaux composites à matrices métallique ou minérale sont adaptés à des températures plus élevées : jusqu'à 600 °C pour une matrice métallique et jusqu'à 1000 °C pour une matrice céramique [3].

I.4. Composants

Les composants principaux des matériaux composites sont le renfort et la matrice. Le renfort joue un rôle crucial en conférant au matériau composite des performances mécaniques élevées. La matrice, également appelée liant, a pour fonction de transmettre les sollicitations mécaniques extérieures aux fibres et de protéger ces dernières contre les agressions extérieures.

Il est également courant d'ajouter des additifs pour modifier certaines propriétés physiques ou chimiques. Ces additifs sont utilisés à des fins économiques et parfois pour faciliter le processus de mise en œuvre [5].

I.4.1. Renforts

Le renfort constitue l'élément prédominant d'un matériau composite, assurant ses propriétés mécaniques telles que la rigidité, la résistance à la rupture et la dureté. De plus, il peut contribuer à améliorer diverses propriétés physiques du composite, notamment son comportement thermique, sa résistance aux températures élevées, sa résistance au feu et à l'abrasion. Selon l'application envisagée, les renforts peuvent avoir des origines diverses, comme illustré sur la figure 2.

Les caractéristiques physiques et mécaniques sont étroitement liées à la nature des fibres utilisées. La forme du renfort est déterminée par l'application spécifique et le volume des pièces à produire, ce qui permet de distinguer deux grandes catégories.

Chapitre I : Généralités sur les matériaux composites

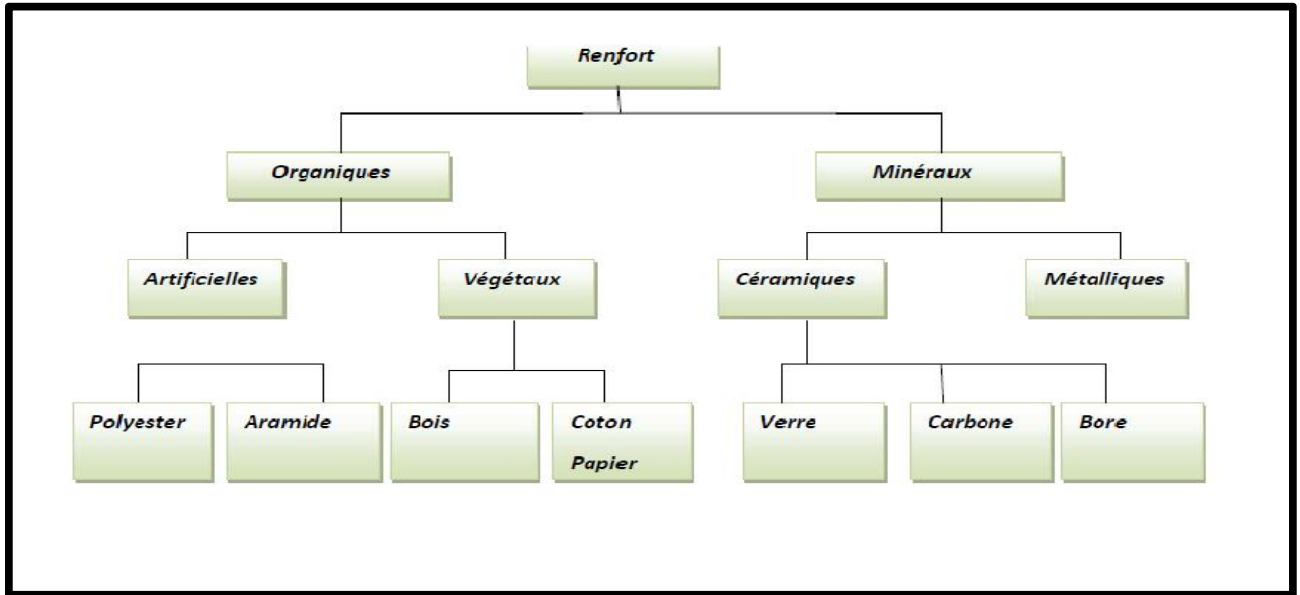


Figure I. 2: Les différents types de renforts de base [2].

I.4.1.1. Renfort en fibres discontinues

Les renforts en fibres discontinues se composent de fibres courtes, de particules, ou d'une combinaison des deux. Ils sont employés afin d'améliorer certaines propriétés de la matrice, notamment la résistance à l'usure, les caractéristiques thermiques, et le poids. La matrice demeure l'élément fondamental du composite, le qualifiant ainsi de « polymère renforcé » [5].

I.4.1.2. Renfort continu

Les renforts continus se composent de fibres longues et ininterrompues, et sont couramment utilisés dans la fabrication de composites à haute performance. Cette forme fibreuse confère une résistance à la rupture et un module d'élasticité bien supérieurs à ceux du même matériau en masse. Ces renforts garantissent la robustesse mécanique des composites et sont agencés dans le matériau en fonction des propriétés recherchées. Pour créer une structure résistante adaptée aux contraintes mécaniques, différentes architectures de renforts sont envisageables, notamment unidirectionnelle, bidirectionnelle ou tridimensionnelle [5].

I.4.1.3. Les différents types de renfort

A. Les fibres de verre

Les fibres de verre sont produites à partir de silice et d'additifs. En fonction des applications spécifiques, ces fibres sont classées en trois catégories :

- Fibres de type E pour les composites à grande diffusion (GD).
- Fibres de type D destinées aux applications dans la construction électrique, notamment pour les circuits imprimés.

Chapitre I : Généralités sur les matériaux composites

- Fibres de type R spécialement conçues pour les composites à haute performance (HP).

Les fibres de verre, avec une production de 500 kT/an en Europe, représentent l'utilisation principale dans plus de 95% des composites, en particulier pour les produits de grande diffusion (GD). Elles offrent des avantages significatifs, avec un coût raisonnable compris entre 1,5 et 7,5 €/kg :

- Une excellente adhérence entre les fibres et les résines (matrices).
- Des propriétés mécaniques satisfaisantes, bien qu'inférieures à celles de la fibre de carbone.
- Des propriétés d'isolation électrique acceptables pour la plupart des applications.

L'utilisation des fibres de verre dans les composites est principalement restreinte en raison de :

- L'utilisation des fibres de verre dans les composites est principalement.
- Une rigidité qui peut être insuffisante pour certaines applications, notamment pour les pièces de structure primaire en aéronautique.
- Un vieillissement accéléré lors d'un contact prolongé avec l'eau et une exposition aux rayonnements UV. Les principaux producteurs de fibres de verre comprennent Saint Gobain Vetrotex, Owens Corning, et PPG.

B. La fibre carbone

La production actuelle de fibres de carbone destinées aux renforts de composites s'élève à 3 000 tonnes par an. Ces fibres sont principalement utilisées dans la fabrication de composites "hautes performances" pour l'aéronautique, la construction industrielle, ainsi que dans le domaine des sports et loisirs. En dehors des secteurs de l'aéronautique et des sports et loisirs, l'adoption généralisée des composites à fibres de carbone, notamment dans les composites de "grande diffusion", dépend largement d'une réduction significative des prix actuels des fibres les moins coûteuses (15 à 17 €/kg). Il serait souhaitable d'atteindre des prix compris entre 4,5 et 7,5 €/kg.

C. La fibre aramide

Cette fibre est issue de la chimie organique des polyamides par synthèse chimique à basse température, et elle est souvent désignée sous le nom de "Kevlar", une marque de Dupont de Nemours. Les composites renforcés de fibres d'aramide présentent une stabilité en température appréciable (jusqu'à 200 °C en fonction de la matrice), mais ils souffrent d'une adhérence moyenne entre la matrice et la fibre, ainsi que d'un coût encore élevé, oscillant entre 30 € et 120 €/kg. La production mondiale de fibres d'aramide atteint 40 000 tonnes par an, mais seulement 4 000 tonnes sont utilisées dans la fabrication de composites.

D. Les fibres de polyéthylène haut ténacité

Les fibres de polyéthylène présentent des avantages tels que la légèreté (densité de 0,95 comparée à celle de l'aramide de densité 1,44) et une capacité élevée à convertir l'énergie cinétique en énergie thermique [5]. Les composites à fibres de polyéthylène sont principalement utilisés dans des applications balistiques et de blindage. Cependant, leur champ d'application est restreint en raison de leurs principales faiblesses:

- Faible résistance à la température (fluage dès 90°C, tandis que l'aramide ne se dégrade qu'à 400°C).

Chapitre I : Généralités sur les matériaux composites

- Adhérence médiocre entre les fibres et la matrice.

La production mondiale de fibres de polyéthylène haute ténacité atteint 2 000 à 3 000 tonnes par an, dont moins de 200 tonnes sont utilisées dans la fabrication de composites. Les principales marques incluent Dyneema de DSM aux Pays-Bas et Spectra aux États-Unis.

E. Les fibres naturelles

Les fibres naturelles offrent un potentiel prometteur en tant que substituts des fibres de verre dans les composites, principalement en raison de leur recyclabilité et de leur facilité de mise en œuvre. Néanmoins, plusieurs défis techniques doivent encore être surmontés avant qu'elles ne puissent être largement adoptées [5].

✓ Avantages

- Recyclabilité : Les fibres naturelles offrent la possibilité d'un recyclage par incinération, contribuant ainsi à la réduction des déchets tout en générant de l'énergie.
- Facilité de mise en œuvre : Les fibres naturelles peuvent être aisément travaillées avec des technologies textiles telles que le tissage ou le moulage.
- Propriétés mécaniques : Il est envisageable que les propriétés mécaniques des fibres naturelles puissent rivaliser avec celles des fibres de verre, notamment en termes de rigidité.

✓ Inconvénient

- Reproductibilité : Les propriétés physiques des fibres naturelles ne sont pas toujours reproductibles de manière constante, ce qui peut restreindre leur utilisation industrielle.
- Variabilité : La quantité et la qualité des fibres naturelles produites peuvent présenter des variations en fonction de l'environnement.
- Hygroscopicité : Les fibres naturelles ont la capacité d'absorber l'humidité, ce qui peut influencer leurs propriétés mécaniques.
- Manipulation : Les fibres naturelles peuvent être plus délicates à manipuler par rapport aux fibres de verre, en particulier en raison de leur longueur et de leur fragilité.

F. Les polymères biodégradables à base d'acide polylactique (PLA)

Ces matériaux sont employés dans la fabrication de composites associant des fibres et une matrice PLA, notamment pour des applications médicales d'ostéosynthèse. Ils représentent ainsi de potentielles alternatives innovantes aux fibres actuellement disponibles [5].

I.4.1.4. Architectures de renforcement

L'architecture de renforcement des composites se réfère à la disposition des fibres au sein de la matrice. Cette organisation a une influence directe sur les propriétés mécaniques du composite, incluant sa résistance, sa rigidité et sa ductilité. Les configurations de renforcement les plus fréquemment rencontrées comprennent :

Chapitre I : Généralités sur les matériaux composites

- **Unidirectionnelle** : les fibres sont alignées dans une seule direction, conférant ainsi au composite une résistance élevée dans cette direction spécifique, mais une résistance moindre dans les autres directions. Cette architecture est fréquemment employée pour les pièces soumises à des charges uniaxiales, telles que les poutres ou les plaques (Figure.I.3).

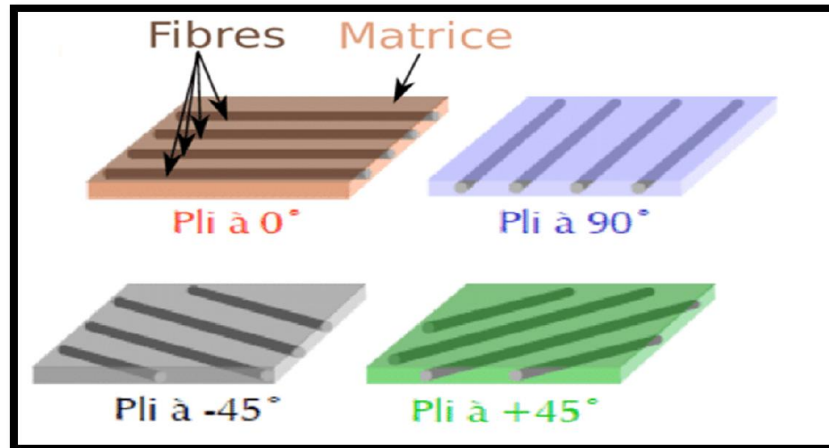


Figure I. 3 : Les fibres Unidirectionnelles [1].

- **Multidirectionnelle aléatoire** : les fibres sont positionnées dans diverses directions de manière aléatoire. Cette configuration confère au composite une résistance plus uniforme dans toutes les directions. Elle est couramment appliquée pour les pièces exposées à des charges multidirectionnelles, telles que les coques ou les réservoirs (Figure.I.4).

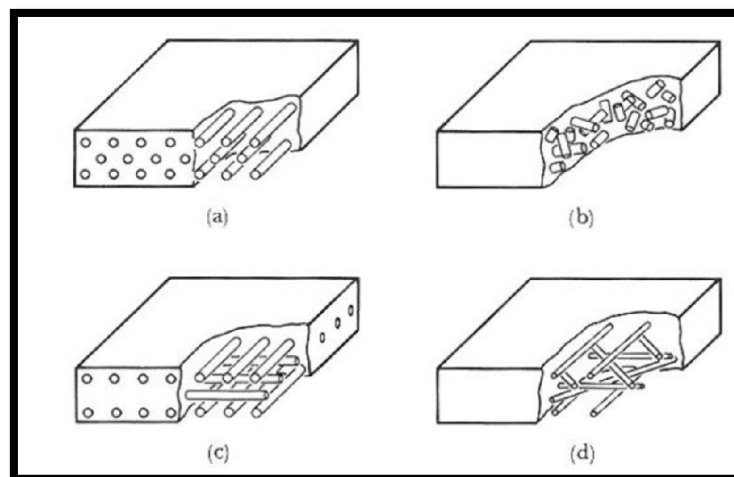


Figure I. 4 : Les fibres Multidirectionnelles aléatoires [1].

- **Multidirectionnelle tissée** : les fibres sont agencées dans un motif tissé, conférant ainsi au composite une résistance plus élevée que celle obtenue avec la disposition multidirectionnelle aléatoire. Cette configuration est fréquemment adoptée pour les pièces soumises à des charges importantes, comme celles utilisées dans les secteurs aéronautique ou maritime (Figure.I.5).

Chapitre I : Généralités sur les matériaux composites

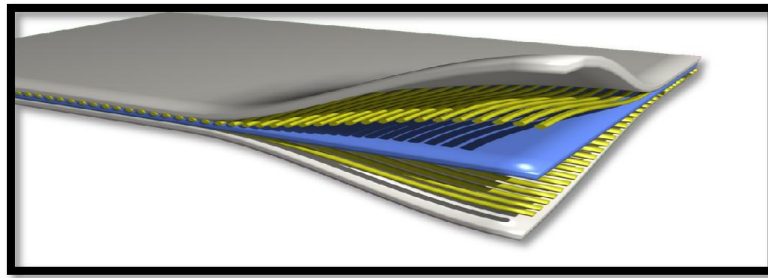


Figure I. 5 : Les fibres Multidirectionnelles tissées [1].

- **Tridimensionnelle** : les fibres sont positionnées dans les trois dimensions, conférant ainsi au composite une résistance encore plus élevée que les autres architectures. Cette configuration est fréquemment choisie pour les pièces soumises à des charges extrêmement élevées, comme les composants structuraux dans les domaines aérospatial ou naval.

Le choix de l'architecture de renforcement est dicté par les propriétés mécaniques recherchées pour la pièce composite. Par exemple, une architecture unidirectionnelle sera la plus appropriée pour une pièce exposée à des charges uniaxiales élevées, tandis qu'une architecture multidirectionnelle aléatoire ou tissée sera plus adaptée pour une pièce soumise à des charges multidirectionnelles [1].

I.4.2. Matrice

Dans un matériau composite, le terme "matrice" fait référence à la substance solide qui enveloppe les renforts, créant ainsi une masse compacte. La principale fonction de la matrice est de maintenir les renforts dans une forme compacte tout en conférant la forme souhaitée au produit final. Elle joue également un rôle crucial dans la protection des fibres contre l'abrasion et les environnements agressifs, dans le contrôle de la finition de surface et dans la transmission efficace des charges entre les fibres. La matrice peut être composée de matériaux métalliques, céramiques ou polymères [6].

La classification des types de matrices fréquemment rencontrées est présentée dans la figure I.6.

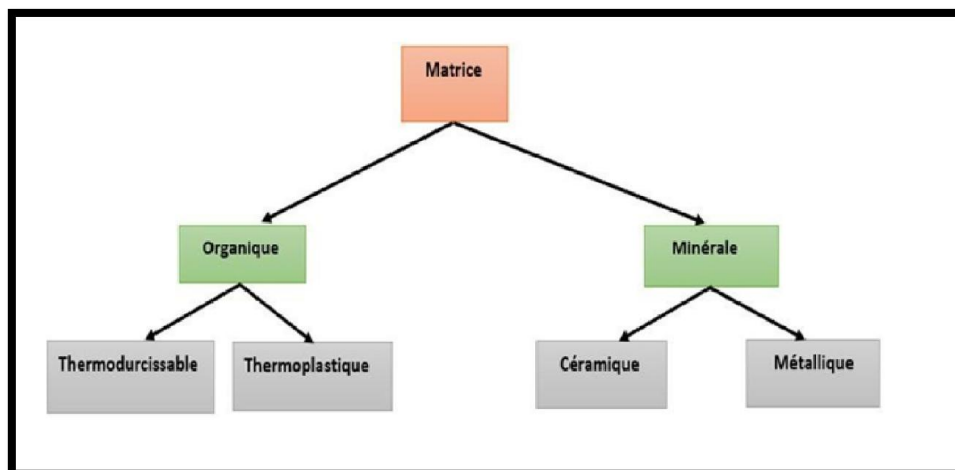


Figure I. 6: Les Classification des matrices [1].

Chapitre I : Généralités sur les matériaux composites

I.4.2.1. Les matrices organique

A. Matrices thermodurcissables :

Les matrices thermodurcissables présentent une stabilité thermique supérieure à celle des matrices thermoplastiques, ce qui constitue un avantage significatif pour les applications exigeantes. Les charges sont incorporées dans les polymères pour diverses raisons, notamment la réduction des coûts, l'amélioration du traitement, la modification de la densité, de la conductivité thermique, de la dilatation thermique, des propriétés électriques, magnétiques, de la résistance au feu, et des propriétés mécaniques. De manière générale, les charges peuvent altérer plusieurs propriétés des composés polymères, telles que la couleur, la viscosité, les propriétés de barrière, les propriétés électriques et thermiques, la finition de surface, ainsi que le retrait [7].

- Parmi les résines thermodurcissables les plus couramment utilisées actuellement, on retrouve :

- **Résines époxydes** : Constituent la résine de référence pour les composites.
- **Résines phénoliques** : Obtenues par la polycondensation du phénol et du formol, elles présentent une excellente résistance au feu sans émission de fumée, ce qui les rend appropriées pour les applications dans les transports ferroviaires. Cependant, elles sont fragiles, sensibles à l'humidité et complexes à mettre en œuvre.
- **Polyuréthannes** : Caractérisées par une faible viscosité qui facilitent le remplissage efficace du moule.
- **Polyesters insaturés** : Ce sont les résines les plus utilisées dans diverses applications. Elles se présentent sous forme d'une solution de polyacide et de polyalcool, durcissant sous l'influence d'un catalyseur et de la chaleur. Cependant, elles émettent des vapeurs de styrène pendant la polymérisation et peuvent être délicates à stocker. Vinylesters : Variantes des polyesters obtenues à partir d'acide acrylique. Elles présentent une bonne résistance à la fatigue et un comportement satisfaisant face à la corrosion, bien que leur inflammabilité soit un inconvénient [8].

B. Matrice thermoplastique :

Les résines thermoplastiques présentent généralement des propriétés mécaniques relativement faibles. Ces résines, caractérisées par leur dureté et leur solidité, nécessitent un traitement à des températures très élevées.

- **Polyamide (PA)** : Offre une bonne résistance aux chocs et à la fatigue, ainsi qu'une résistance appréciable aux hydrocarbures.
- **Polytéréphtalate éthylénique (PET) et Polytéréphtalate de butylène (PBT)** : Présentent une bonne rigidité et ténacité.
- **Polycarbonate (PC)** : Se distingue par sa résistance aux chocs.
- **Polysulfure de phénylène (PPS)** : Connu pour sa résistance à l'hydrolyse.
- **Polyoxyméthylène (POM)** : Présente une bonne résistance à la fatigue.

Chapitre I : Généralités sur les matériaux composites

- **Polysulfones (PSU et PPS)** : Offrent une stabilité chimique et à l'hydrolyse appréciables, avec peu de fluage.
- **Polypropylène (PP)** : Économique et relativement stable en termes de température, mais combustible [9].

I.4.2.2. Les matrices minérales

A. les matrices métalliques

Les composites à matrice métallique ont été conçus pour améliorer certaines caractéristiques des métaux et pour surmonter certaines limitations des composites à matrice organique, telles que la température d'utilisation limitée et le vieillissement. Le renforcement des métaux et de leurs alliages par des fibres permet d'accroître la rigidité, la résistance mécanique et la résistance à la fatigue à température ambiante. Ces matériaux offrent une excellente résistance à l'environnement, sont insensibles aux rayons UV, et présentent une stabilité dimensionnelle ainsi qu'une conductivité électrique et thermique élevées [10].

B. les matrices céramiques

Les composites à matrice céramique (CMC) sont des matériaux composites composés d'une matrice céramique et d'un renfort. Ils sont largement utilisés dans des applications nécessitant une résistance extrêmement élevée, notamment dans la fabrication de disques de frein pour avions et voitures. Les matrices céramiques sont des matériaux qui présentent une résistance exceptionnelle à la chaleur et à la corrosion. Ces matrices sont généralement constituées de matériaux tels que le carbone, le carbure de silicium (SiC), l'alumine ou le verre [10].

I.4.2.3. Charges renforçantes

Ce sont des substances ajoutées à une résine pour améliorer ses propriétés mécaniques. Elles peuvent être classées en deux catégories en fonction de leur forme géométrique :

- **Charges sphériques** : Les particules sphériques présentent des avantages liés à leur forme, notamment en évitant les concentrations de contraintes, ce qui réduit la susceptibilité à la fissuration de la matrice par rapport à des particules non sphériques. Ces sphères ont généralement un diamètre compris entre 10 et 150 μm et peuvent être constituées de verre, de carbone ou de matière organique.
- **Charges non sphériques** : Le mica est un matériau largement étudié dans cette catégorie. Il est ajouté sous forme d'écaillés, avec des dimensions transversales de 100 à 500 μm et une épaisseur de 1 à 20 μm . Il est fréquemment incorporé dans des résines thermoplastiques ou thermodurcissables. Ce type de composite trouve généralement des applications dans les domaines électriques ou électroniques.

I.4.2.4. Charges non renforçantes

Ces charges sont employées pour modifier les propriétés des résines sans nécessairement améliorer leurs caractéristiques mécaniques. Elles sont utilisées pour divers objectifs tels que la réduction des coûts des

Chapitre I : Généralités sur les matériaux composites

résines, l'amélioration de leur stabilité, de leur conductivité thermique ou électrique, ou encore de leur couleur.

Parmi ces catégories, on distingue :

- Charges économiques.
- Charges ignifuges.
- Charges conductrices et antistatiques [11].

I.4.3. Additifs

Les additifs sont des substances ajoutées en faible quantité aux résines pour en modifier les propriétés. Ils peuvent être classés en quatre catégories.

- Les lubrifiants et agents de démoulage facilitent le démoulage des pièces moulées.
- Les pigments et colorants donnent aux résines la couleur souhaitée.
- Les agents anti-retraits réduisent le retrait des résines lors de leur durcissement.

Les agents anti-ultraviolets protègent les résines des rayons ultraviolets du soleil [11].

I.5. Matériaux composites structuraux

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

- Les monocouches.
- Les stratifiées.
- Les sandwiches.

I.5.1. Le monocouche

La monocouche constitue l'élément de base de la structure composite, composée d'une matrice et d'un renfort. La forme du renfort détermine le type de monocouche :

- Les monocouches à fibres longues sont constituées de fibres longues orientées dans une direction, offrant une résistance élevée dans cette direction.
- Les monocouches à fibres réparties aléatoirement comprennent des fibres longues orientées dans diverses directions, assurant une résistance plus uniforme dans toutes les directions.
- Les monocouches à fibres tissées sont formées de fibres tissées ensemble, présentant une résistance élevée dans les deux directions principales du tissage.
- Les monocouches à fibres courtes sont composées de fibres courtes orientées dans une direction, offrant une résistance moindre que les monocouches à fibres longues, mais elles sont plus faciles à fabriquer [12].

I.5.2. Le stratifiés

Un stratifié est un matériau composite composé de plusieurs couches de matériaux différents, chacune ayant une orientation spécifique définie par rapport à un référentiel commun, appelé le référentiel du stratifié. En ajustant l'ordre et l'orientation des couches, il est possible de modifier les propriétés

Chapitre I : Généralités sur les matériaux composites

mécaniques du stratifié. Par exemple, en disposant des couches de renfort dans les directions soumises à des contraintes, on peut accroître sa résistance dans ces directions (Figure.I.7) [13].

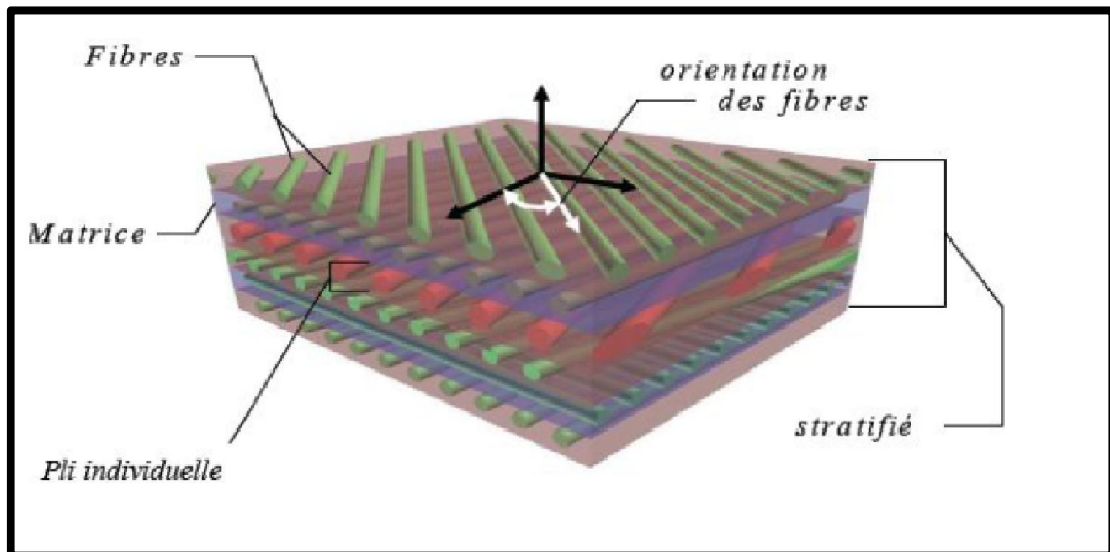


Figure I. 7: Composites stratifiés [13].

I.5.3. Sandwichs

Les matériaux sandwich se composent de deux semelles (ou peaux) de grande rigidité et faible épaisseur enveloppant une âme (ou cœur) de forte épaisseur et faible résistance. Cette structure confère au matériau sandwich une légèreté considérable en flexion, en plus de le rendre excellent en tant qu'isolant thermique (Figure.I.8) [13].

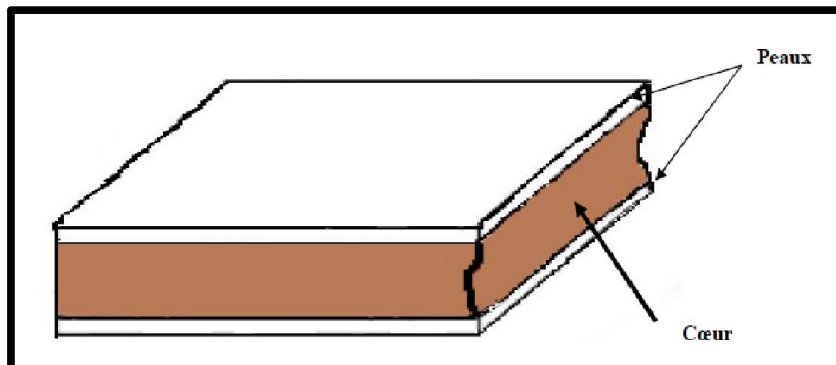


Figure I. 8: Composite sandwichs [13].

I.6. Technologie de la mise en œuvre

La technologie de la mise en œuvre des matériaux composites englobe les méthodes de fabrication et de mise en forme de ces matériaux. Bien qu'il existe diverses techniques, le moulage demeure la méthode la plus couramment employée.

Parmi les procédés les plus significatifs, on trouve :

Chapitre I : Généralités sur les matériaux composites

□ Moulages sans pression

Les méthodes de moulage à froid, sans presse, sont particulièrement accessibles et simples à mettre en œuvre. Elles requièrent un équipement et un investissement limités, contribuant ainsi à la popularité des matériaux composites à fibres dans l'industrie et l'artisanat. Ces méthodes sont adaptées à la fabrication de pièces en petites et moyennes séries, présentant diverses formes et dimensions. Bien que la proportion de fibres puisse varier, elle est généralement limitée. La surface visible de la pièce est lisse, similaire au moule. La qualité finale de la pièce dépend largement de l'expertise du mouleur.

□ Moulage au contact

Le moulage au contact est une méthode de fabrication de pièces prototypes ou destinées à la simulation. Elle implique l'imprégnation manuelle de renforts tels que des fibres de verre ou de carbone avec de la résine dans un moule. Bien que cette technique soit économique et adaptée à la réalisation de pièces aux formes complexes, sa cadence de production est limitée en raison du caractère entièrement manuel du processus.

□ Moulage par projection simultanée

Le moulage par projection simultanée est une méthode de fabrication de pièces composites similaire au moulage au contact, mais elle utilise un pistolet pour projeter les fibres coupées sur le moule. Comparé au moulage au contact, cette technique présente plusieurs avantages :

- Une cadence de production plus élevée grâce à l'automatisation de la projection des fibres.
- La possibilité de fabriquer des pièces de plus grandes dimensions, car les fibres sont projetées sur toute la surface du moule.
- Une plus grande polyvalence, car la technique peut être utilisée pour produire une variété étendue de pièces.

Cependant, le moulage par projection simultanée comporte également quelques inconvénients :

- Un coût plus élevé en raison de l'équipement plus cher, notamment le pistolet.
- Une plus grande complexité nécessitant une formation approfondie des opérateurs.

□ Injection thermodurcissable BMC

Le Bulk Molding Compound (BMC) ou matériau moulé en vrac est un procédé discontinu à haute pression (100 bars) permettant la production en grande série de pièces composites.

Les avantages du procédé BMC sont les suivants

- ❖ Production en grande série : Ce procédé est automatisable, adapté à la réalisation de pièces en grandes quantités.
- ❖ Coût matière réduit : Le Compound est un matériau économique.

Chapitre I : Généralités sur les matériaux composites

- ❖ Finition minimale : Les pièces moulées ont généralement une surface lisse, nécessitant peu d'opérations de finition.
- ❖ Temps de cycle court : Le temps de cycle étant relativement court, la productivité peut être accrue.

Les inconvénients du procédé BMC sont les suivantes

- ❖ Les propriétés mécaniques du composite final sont généralement moindres que celles des composites fabriqués par d'autres méthodes [14].

□ Pultrusion

La pultrusion est un processus continu de fabrication de pièces composites impliquant le tirage, la mise en forme et la polymérisation de fibres continues imprégnées.

Avantages de la pultrusion :

- Production continue : La pultrusion offre une production continue, augmentant ainsi la productivité.
- Réalisation de sections complexes : Ce procédé permet la fabrication de pièces de formes complexes pour répondre à des besoins spécifiques.
- Taux de renfort élevé : La pultrusion permet d'atteindre un taux de renfort élevé, améliorant ainsi les propriétés mécaniques des pièces.

Inconvénients de la pultrusion :

- La pultrusion est un processus relativement lent, ce qui peut limiter sa productivité.
- La pultrusion est limitée à la fabrication de profilés droits à section constante.

□ Compression thermodurcissable SMC

Le moulage par compression de matériaux thermodurcissables SMC (Sheet Molding Compound ou pré-imprégné en feuille) est un procédé de fabrication de pièces composites. Il implique le placement de feuilles de matériau pré-imprégné dans un contre-moule chauffé, suivi de la compression du matériau à l'aide d'un moule chauffé. La résine imprégnant les fibres polymérise sous l'effet de la chaleur, et une fois le processus terminé, la pièce est éjectée du moule [14].

Les Avantages :

- Le matériau SMC présente une économie de coûts relative.
- Les SMC offrent des propriétés mécaniques et thermiques de qualité.

Les inconvénients :

- Les surfaces des pièces moulées par SMC peuvent présenter des aspérités et nécessiter une opération de finition.
- Les pièces moulées par SMC exigent une étape de finition, pouvant entraîner une augmentation des coûts de production [1-14].

Chapitre I : Généralités sur les matériaux composites

I.7. Avantage et inconvénients des matériaux composites

I.7.1. Les Avantages

- **Résistance élevée** : Les matériaux composites sont généralement plus résistants que les matériaux traditionnels tels que l'acier ou le béton. Ils peuvent supporter des charges plus lourdes et résister mieux aux chocs et aux vibrations.
- **Légèreté** : Les matériaux composites sont plus légers que les matériaux traditionnels, contribuant ainsi à la réduction du poids des structures et des bâtiments. Cela peut se traduire par des économies de matériaux et d'énergie, ainsi qu'une amélioration de l'efficacité énergétique.
- **Durabilité** : Les matériaux composites sont plus durables que les matériaux traditionnels et résistent mieux à la corrosion, aux intempéries et aux agressions chimiques. Cette caractéristique peut entraîner des économies significatives en termes de maintenance et de réparation.
- **Design innovant** : Les matériaux composites offrent la possibilité de concevoir des structures et des bâtiments innovants, avec des formes et des fonctionnalités impossibles à réaliser avec des matériaux traditionnels.

I.7.2. Les inconvénients

- **Coût** : Les matériaux composites peuvent engendrer des coûts plus élevés que les matériaux traditionnels, en particulier dans le cadre d'applications de grande série.
- **Fabrication** : La fabrication des matériaux composites peut être plus complexe que celle des matériaux traditionnels, ce qui peut restreindre leur adoption à grande échelle.
- **Recyclage** : Le recyclage des matériaux composites peut représenter un défi, pouvant entraîner des préoccupations environnementales.

I.8. Domaine d'utilisation des matériaux composites

Les matériaux composites sont employés dans diverses applications en génie civil, notamment :

- **Structures** : Les matériaux composites sont employés pour la fabrication de structures telles que des ponts, des bâtiments et des pylônes, offrant ainsi des avantages en termes de légèreté, de résistance et de durabilité.
- **Revêtements** : Les matériaux composites sont utilisés pour la création de revêtements destinés aux structures comme les ponts, les bâtiments et les réservoirs. Ils assurent une protection contre la corrosion, les conditions météorologiques et les agressions chimiques.
- **Composants** : Les matériaux composites sont utilisés dans la fabrication de divers composants structurels tels que des poutres, des colonnes et des câbles, offrant une amélioration notable de la résistance et de la durabilité.

Chapitre I : Généralités sur les matériaux composites

Les matériaux composites sont une technologie prometteuse qui offre un certain nombre d'avantages par rapport aux matériaux traditionnels. Cependant, il est important de prendre en compte les inconvénients potentiels de ces matériaux avant de les adopter [15].

I.9. Conclusion

Les matériaux composites représentent une innovation notable, offrant plusieurs avantages par rapport aux matériaux traditionnels tels que les métaux. Les fabricants de matériaux composites aspirent à rivaliser voire surpasser les métaux en élaborant des composites aux propriétés encore plus performantes. La variété des matériaux composites et leur adaptabilité permettent la création de matériaux sur mesure répondant aux besoins spécifiques des applications. Cette aspiration est justifiée, mais pour y parvenir, le secteur des matériaux composites doit évoluer grâce à l'innovation. Cela implique le développement de nouveaux matériaux composites, de méthodes de fabrication novatrices et de nouveaux procédés de traitement.

Chapitre II : Etude des fibres naturelles végétales

Chapitre II : Etude des fibres naturelles végétales

II.1. Introduction

L'incorporation de fibres dans les matériaux cimentaires peut significativement améliorer leurs propriétés mécaniques et physiques. Les matériaux renforcés par des fibres, bien qu'en phase de développement, offrent un potentiel révolutionnaire pour l'industrie, notamment dans le secteur de la construction.

Les fibres, des éléments longs et fins, peuvent être fabriquées à partir de divers matériaux tels que le métal, le plastique ou les végétaux. Les fibres végétales se présentent comme une option prometteuse pour le renforcement des matériaux cimentaires, étant donné leur durabilité, leur coût réduit et leur caractère respectueux de l'environnement.

Dans ce deuxième chapitre, nous explorerons les fibres végétales et leurs applications, en examinant les différents types disponibles, leurs caractéristiques et leurs utilisations dans la construction. Voici quelques exemples d'applications des fibres végétales dans le domaine de la construction :

- Renforcement des éléments structurels tels que les poutres et les dalles.
- Amélioration de la résistance à la fissuration des revêtements de sol et des parois.
- Atténuation du bruit et des vibrations.

Les fibres végétales représentent une technologie émergente avec le potentiel de révolutionner l'industrie de la construction. En poursuivant le développement et l'amélioration des matériaux renforcés par des fibres végétales, nous pouvons créer des structures plus durables, résistantes et respectueuses de l'environnement.

II.2. Historique

L'utilisation des fibres naturelles dans le domaine du génie civil remonte à l'Antiquité, où les Égyptiens, les Romains et d'autres civilisations anciennes utilisaient des fibres de paille, de jute et de chanvre pour renforcer les matériaux de construction tels que le mortier et le béton.

La première utilisation officiellement documentée de fibres naturelles dans le génie civil remonte à 2500 avant JC, lorsque les Égyptiens employaient des fibres de paille pour renforcer le mortier utilisé dans la construction des pyramides. Les Romains ont également eu recours aux fibres naturelles pour renforcer leurs structures, y compris le Colisée et le Pont du Gard.

Au Moyen Âge, l'usage des fibres naturelles dans le génie civil s'est généralisé. Les fibres de chanvre étaient particulièrement prisées en raison de leur robustesse et de leur durabilité, servant à renforcer les murs, les ponts et autres ouvrages.

Avec le début de l'ère industrielle, les fibres naturelles ont été progressivement remplacées par les fibres synthétiques, jugées plus faciles à produire et moins coûteuses. Cependant, ces dernières années, l'intérêt pour les fibres naturelles a ressurgi, principalement en raison de leur durabilité, de leur coût modéré et de leur moindre impact environnemental [16].

Chapitre II : Etude des fibres naturelles végétales

II.3. Fibres naturelles

Les fibres naturelles peuvent être regroupées en trois grandes catégories selon leur origine (Figure.II.1):

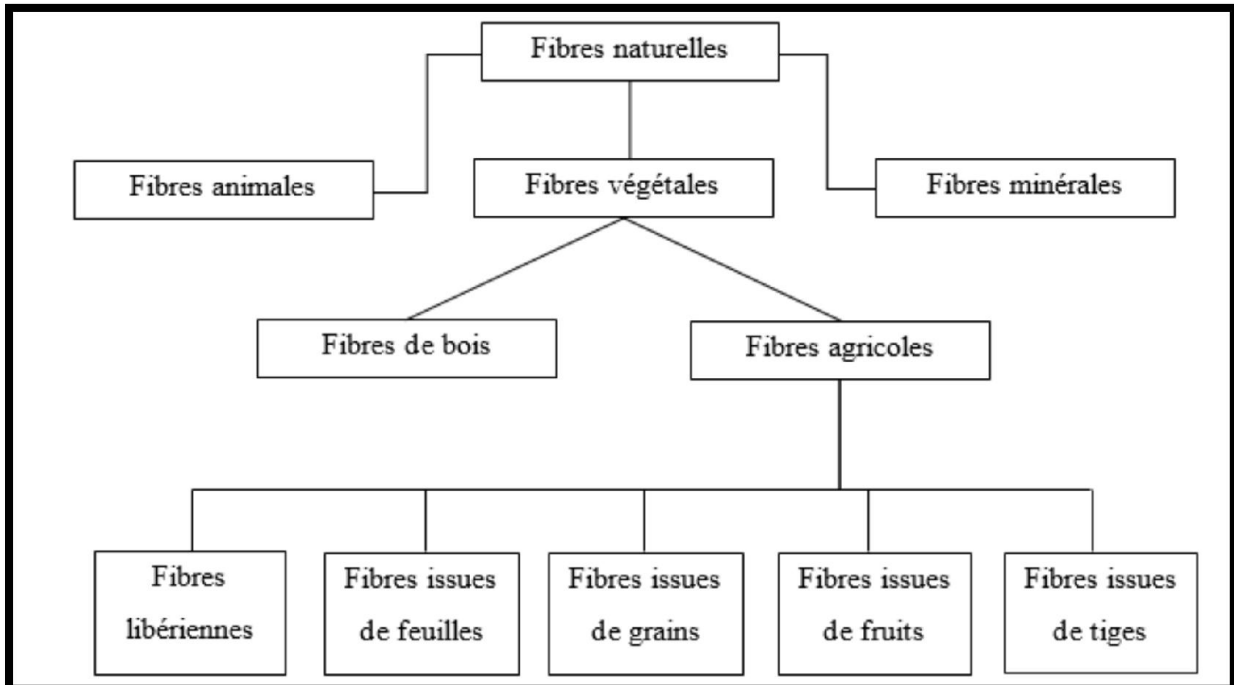


Figure II. 1: Classification des fibres naturelles [6].

- Les fibres végétales, dérivées de plantes, se composent principalement de cellulose, d'hémicellulose et de lignine. Elles sont parmi les plus répandues et trouvent leur utilisation dans une diversité d'applications, notamment dans l'industrie textile, la construction et l'emballage (Figure.II.2).



Figure II. 2: Fibres végétales (alfa).

Chapitre II : Etude des fibres naturelles végétales

- Les fibres animales sont issues d'animaux et sont principalement composées de kératine, une protéine naturelle. Parmi les types de fibres animales les plus répandus, on compte la laine, la soie et la fourrure. Leur utilisation est répandue dans divers secteurs, notamment l'industrie textile, l'isolation et la filtration (Figure.II.3).



Figure II. 3: Les fibres animales (la laine).

- Les fibres minérales sont dérivées de minéraux et sont composées principalement de silice, d'alumine ou d'autres minéraux. Parmi les fibres minérales les plus courantes, on trouve la fibre de verre et la fibre de carbone. Elles sont largement utilisées dans divers domaines tels que la construction, l'automobile et l'aérospatiale (Figure.II.4) [17].

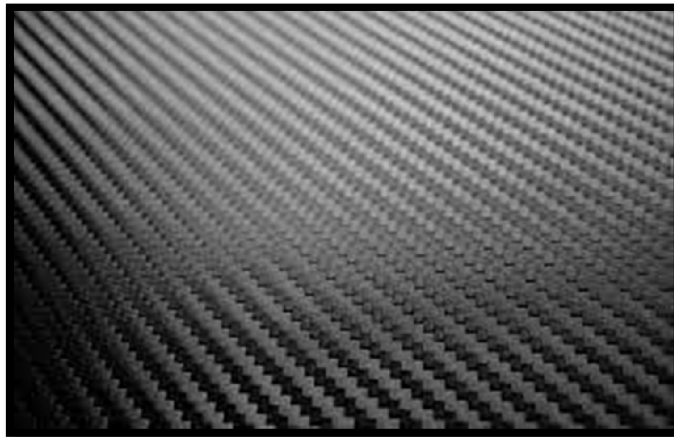


Figure II. 4: La fibre de carbone.

II.3.1. Définition de la fibre végétale

Depuis environ 3000 ans, les fibres végétales sont utilisées dans la fabrication de composites. Par exemple, dans l'ancienne Égypte, on mélangeait de la paille et de l'argile pour construire des murs, mettant ainsi en avant les qualités de ces fibres telles que leur faible coût, leur légèreté, leur

Chapitre II : Etude des fibres naturelles végétales

biodégradabilité, leur disponibilité et leur facilité de manipulation. Ces caractéristiques les rendent attractives pour une variété d'applications, notamment dans le domaine de la construction, où des matériaux légers à haute performance, recyclables et respectueux de l'environnement sont recherchés, tout en réduisant les coûts [18].

Aujourd'hui, dans un contexte où la santé et les considérations économiques influencent le choix des matériaux, les chercheurs se tournent vers le renforcement des bétons par des fibres végétales, surtout dans les pays où ces fibres sont abondantes. Leur intérêt croissant est également motivé par des préoccupations écologiques, car elles offrent des avantages par rapport aux fibres de renforcement traditionnelles telles que le verre.

Au cours de la dernière décennie, le développement de composites intégrant des fibres végétales est devenu un sujet d'intérêt majeur. Renforcer les matériaux de construction, en particulier les bétons et les mortiers, avec des fibres est une technique de plus en plus adoptée pour améliorer leurs performances mécaniques, y compris leur résistance à la traction, à la fissuration et leur ductilité.

Dans des environnements chauds et secs, comme les régions sahariennes, les matériaux hydrauliques tels que les bétons et les mortiers peuvent se dessécher rapidement, entraînant d'importants retraits et des fissures dans les structures. Ainsi, le renforcement de ces matériaux avec des fibres peut offrir des solutions techniques pour améliorer leurs propriétés mécaniques et leur durabilité [18].

II.3.2. Classification des fibres végétales

Les fibres végétales peuvent être classées selon différents critères, notamment :

- A. **Organe de la plante** : Les fibres végétales peuvent provenir des tiges, des feuilles ou des graines :
- Fibres de tiges : Généralement longues et souples, elles proviennent de plantes annuelles comme le kénaf, le jute, le lin ou la ramie.
 - Fibres de feuilles : Plus courtes et plus rigides, elles sont issues de plantes annuelles ou pérennes telles que le sisal, l'abace ou la paille de graminée.
 - Fibres de graines : Généralement courtes et douces, elles proviennent de plantes annuelles ou pérennes telles que le coton ou le lin.
- B. **Composition chimique** : Les fibres végétales sont composées de cellulose, d'hémicellulose et de lignine. La proportion de ces trois composants varie selon l'origine de la fibre :
- Fibres ligneuses : Riches en lignine, elles offrent des propriétés mécaniques élevées et proviennent de plantes ligneuses comme le bois d'œuvre ou les résidus de l'industrie du bois.
 - Fibres non ligneuses : Pauvres en lignine, elles ont des propriétés mécaniques relativement faibles mais une meilleure douceur et biodégradabilité. Elles proviennent de plantes non ligneuses comme le kénaf, le chanvre, le sisal, le jute et le lin.
- C. **Longueur** : Les fibres végétales peuvent être classées en deux catégories selon leur longueur :
- Fibres longues : Ayant une longueur supérieure à 10 mm, elles sont généralement issues des tiges de plantes annuelles.
 - Fibres courtes : Ayant une longueur inférieure à 10 mm, elles proviennent généralement des feuilles, des graines ou des résidus de l'industrie du bois [19].

Chapitre II : Etude des fibres naturelles végétales

II.3.3. Structure et morphologie des fibres naturelles

Les fibres végétales sont principalement composées d'hémicellulose, de pectine et de cellulose, cette dernière étant le seul constituant présentant une forme cristalline qui confère à la fibre des propriétés thermomécaniques intéressantes.

La fibre végétale est elle-même un composite. Le renfort est constitué par les couches de microfibrilles cellulosiques partiellement cristallines, enrobées d'une matrice polysaccharidique amorphe (hémicellulose et pectine) associée par des liaisons hydrogène et covalentes à la lignine. La structure de la fibre végétale comprend plusieurs parois parallèles à l'axe de la fibre, disposées en couches superposées dans le sens radial. Ces couches forment la lamelle moyenne, la paroi primaire et la paroi secondaire, bordant un lumen de diamètre variable selon l'espèce. La paroi secondaire est constituée de trois couches de microfibrilles, qui décrivent un angle microfibrillaire par rapport à l'axe de la fibre, cette valeur variant d'une espèce à l'autre [20].

Au niveau nanooptique, les fibres végétales présentent une structure composite, formée par un faisceau de fibres plus petites appelées fibres simples. Ces fibres simples sont principalement composées de cellulose sous forme de fibres qui agissent comme renfort, enveloppées dans une matrice de lignine et d'hémicellulose, présentant une structure très rigide. Elles mesurent généralement de 1 à 50 mm de long et environ 10 à 50 μm de diamètre [21].

Ses constituants sont les suivants :

- **Cellulose** : Contrairement à d'autres composants fibreux qui présentent une structure amorphe, la cellulose possède en grande partie une structure cristalline. La cellulose cristalline est l'un des polymères présentant le module d'élasticité le plus élevé, environ 136 GPa contre 75 GPa pour les fibres de verre. Cette résistance provient de sa structure cristalline, caractérisée par un arrangement moléculaire hélicoïdal. Lors de l'allongement des fibres, cette structure moléculaire entraîne un couplage torsion/traction qui peut influencer les mécanismes d'interface, de déformation ou de fissuration du composite (Figure.II.5) [22].
- **Hémicellulose** : Les molécules d'hémicellulose présentes dans la paroi cellulaire se lient par des liaisons hydrogène à la cellulose, jouant ainsi le rôle de matrice de cimentation entre les microfibrilles de cellulose. Ce réseau cellulose/hémicellulose est considéré comme le principal composant structurel des fibroblastes [21].
- **Lignine** : La lignine, hydrophobe, agit comme un ciment et contribue à augmenter la dureté du composite cellulose/hémicellulose [21].

Chapitre II : Etude des fibres naturelles végétales

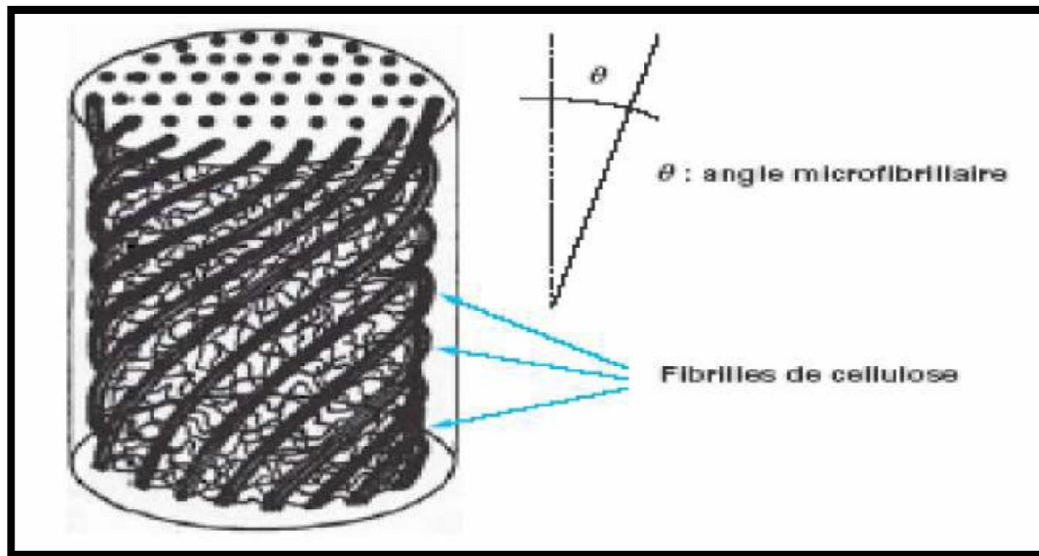


Figure II. 5: Structure d'une micro fibrille de cellulose [20].

Les chaînes de cellulose sont regroupées en structures de base appelées microfibrilles, composées de 30 à 100 molécules de cellulose ayant un diamètre compris entre 10 et 30 nanomètres. Chaque microfibrille peut être vue comme une succession de cristaux de cellulose reliés par des zones amorphes [20].

Les microfibrilles s'organisent en une hélice le long de l'axe de la fibre, formant éventuellement des couches annulaires lorsqu'elles sont observées en coupe transversale [23].

La disposition et l'orientation des microfibrilles de cellulose par rapport à l'axe cellulaire permettent de distinguer trois couches étroitement liées [24].

À un niveau macroscopique, cela se traduit par une paroi cellulaire constituée de plusieurs couches, à savoir [25].

- 1- La lamelle moyenne ou plaque séparatrice : D'une épaisseur comprise entre 0,5 et 2 micromètres, elle est constituée de matériaux bactériens auxquels on peut ajouter de la lignine, permettant ainsi de lier les cellules entre elles.
- 2- Paroi primaire : Très fine, avec une épaisseur variant entre 0,03 et 0,1 micromètre, elle est souvent confondue avec la couche intercellulaire. Cette paroi contient une grande quantité de lignine. Ses fines fibres entrelacées de lignine et de demi-cellulose forment un réseau poreux.
- 3- Paroi secondaire : Elle se compose de trois couches de microfibrilles (S1, S2, S3) :
 - S1 : Une couche externe d'une épaisseur de 0,5 à 2 micromètres, constituée de microfibrilles réticulées, formant un angle compris entre 60° et 80° par rapport à l'axe de la cellule.
 - S2 : Une couche intermédiaire d'une épaisseur de 5 à 10 micromètres, représentant environ 80 % de la section et ayant un impact sur le comportement mécanique. Les microfibrilles de cette couche forment un angle de 5° à 50° par rapport à l'axe de la cellule.

Chapitre II : Etude des fibres naturelles végétales

- S3 : Une couche interne d'une épaisseur de 0,5 à 1 micromètre, constituée de minuscules fibres dont l'orientation varie entre 60° et 90° par rapport à l'axe de la cellule.

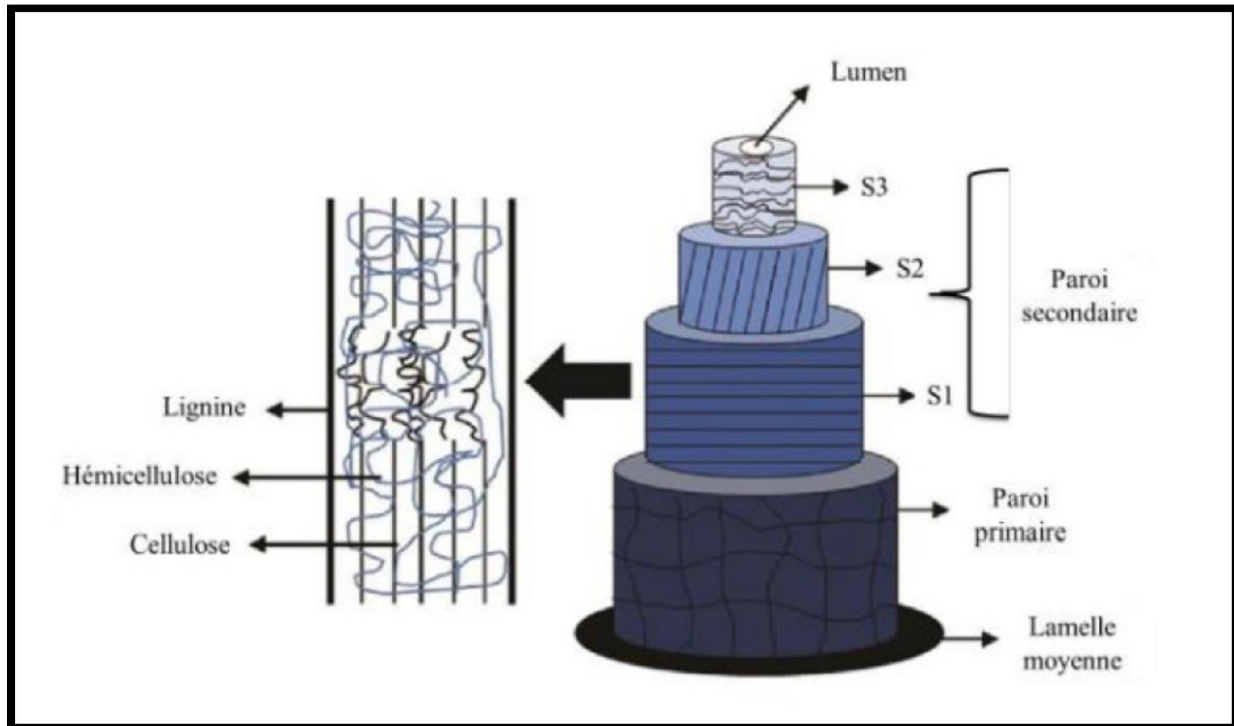


Figure II. 6: Structure d'une fibre élémentaire végétale [27].

Les propriétés mécaniques des fibres végétales sont influencées par plusieurs facteurs, notamment la teneur en cellulose, l'angle des microfibrilles et le degré de polymérisation.

II.3.4. Propriétés mécaniques des fibres naturelles

Les fibres naturelles, en tant que matériaux biosourcés, offrent un potentiel considérable en tant que renforts pour les plastiques. Leur caractère renouvelable, biodégradable et leurs propriétés mécaniques avantageuses, telles qu'une résistance à la traction élevée et une faible densité, les rendent particulièrement attrayantes.

La résistance à la traction, exprimée en mégapascals (MPa), mesure la capacité d'une fibre à résister à une force avant de se rompre. Les fibres naturelles présentent une résistance à la traction comparable à celle des fibres de verre, qui sont les renforts les plus couramment utilisés pour les plastiques. Par exemple, les fibres de lin ont une résistance à la traction d'environ 300 MPa, tandis que les fibres de verre E ont une résistance à la traction d'environ 350 MPa.

La densité, qui représente la masse par unité de volume, est un autre facteur important. Les fibres naturelles ont une densité plus faible que les fibres synthétiques comme les fibres de verre. Par exemple, les fibres de lin ont une densité d'environ 1,5 g/cm³, tandis que les fibres de verre E ont une densité d'environ 2,5 g/cm³.

Chapitre II : Etude des fibres naturelles végétales

Certaines fibres naturelles, telles que le lin et le bois kraft, présentent des propriétés similaires à celles des fibres de verre. Le lin, une fibre cellulosique obtenue à partir des tiges de la plante de lin, et le bois kraft, une fibre cellulosique issue de la pulpe de bois, en sont des exemples.

Les fibres naturelles peuvent être traitées pour améliorer leurs propriétés, par exemple en les transformant en microfibrilles. Ces dernières, des fibres de cellulose très fines, présentent un module d'élasticité plus élevé que les fibres cellulose ordinaires.

La structure des fibres naturelles, notamment leur longueur, influence leurs propriétés, les fibres plus longues étant généralement plus résistantes que les fibres plus courtes.

Bien que les fibres naturelles offrent un potentiel important en tant que renforts pour les plastiques en raison de leurs caractéristiques écologiques et mécaniques, des recherches supplémentaires sont nécessaires pour mieux comprendre et maîtriser leurs propriétés [26].

Fibre	Caractéristiques			
	Masse volumique (g/cm ³)	Allongement (%)	Résistance (MPa)	Module de Young (GPa)
Coton	1,5-1,6	7,0-8,0	287 – 597	5,5 – 12,6
Jute	1,3	1,5-1,8	393-773	26,5
Lin	1,5	2,7-3,2	345-1035	50-70
Chanvre	-	1,6	690	-
Ramie	-	3,6-3,8	400-938	61,4-128
Sisal	1,5	2,0-2,5	511-635	9,4-22,0
Coco	1,2	30,0	175	4,0-6,0
Viscose (corde)	-	11,4	593	11,0
Bois kraft	1,5	-	1000	40,0
Verre-E	2,5	2,5	2000-3500	70,0
Verre-S	2,5	2,8	4570	86,0
Aramide (normal)	1,4	3,3-3,7	3000-3150	63,0-67,0
Carbone (standard)	1,4	1,4-1,8	4000	230,0-240,0

Figure II. 7 : Propriétés mécaniques des fibres naturelles comparées aux renforts [26].

II.4. Paramètres influençant les propriétés des fibres végétales

Les propriétés des fibres végétales sont soumises à l'influence de plusieurs facteurs, parmi lesquels on peut citer :

- ❖ **La composition chimique des fibres** : Les fibres végétales sont constituées de cellulose, de lignine, d'hémicellulose et de cires. La proportion de chaque composant joue un rôle déterminant dans les

Chapitre II : Etude des fibres naturelles végétales

propriétés des fibres. Par exemple, la cellulose confère aux fibres leur résistance mécanique, tandis que la lignine est responsable de leur rigidité [27].

- ❖ **La structure des fibres :** La structure des fibres est dictée par leur processus de croissance et de développement. Elles peuvent être simples, composées de cellules individuelles, ou complexes, formées de plusieurs couches de cellules. Cette structure joue un rôle crucial dans leur résistance à la traction, à la compression et à la flexion.
- ❖ **Les traitements post-récolte :** Les fibres végétales peuvent être soumises à divers traitements après leur récolte, comprenant le séchage, le blanchiment ou des traitements chimiques. Ces processus peuvent altérer les propriétés des fibres, améliorant ainsi leur résistance, leur blancheur ou leur capacité d'absorption d'eau.
- ❖ **Les paramètres climatiques lors de la culture du végétal :** Ces traitements peuvent entraîner des variations dans les propriétés des fibres, ce qui se traduit par des fluctuations dans les caractéristiques du matériau final [3-27-28-32].
- ❖ **L'âge de la plante :** Effectivement, ces traitements peuvent également influencer la variabilité des propriétés des fibres végétales [29].

Il est essentiel de prendre en compte ces facteurs afin d'assurer la qualité et la constance des fibres végétales, ainsi que pour adapter les procédés de transformation à leurs propriétés spécifiques.

II.5. Présentations des différentes fibres végétales

II.5.1. Alfa

L'alfa, une plante herbacée vivace de la famille des Poaceae, est originaire du Sahara et du Sahel. Elle est cultivée pour ses fibres, largement utilisées dans diverses applications telles que la fabrication de papier, de textiles, de cordages et de tapis (Figure.II.8).

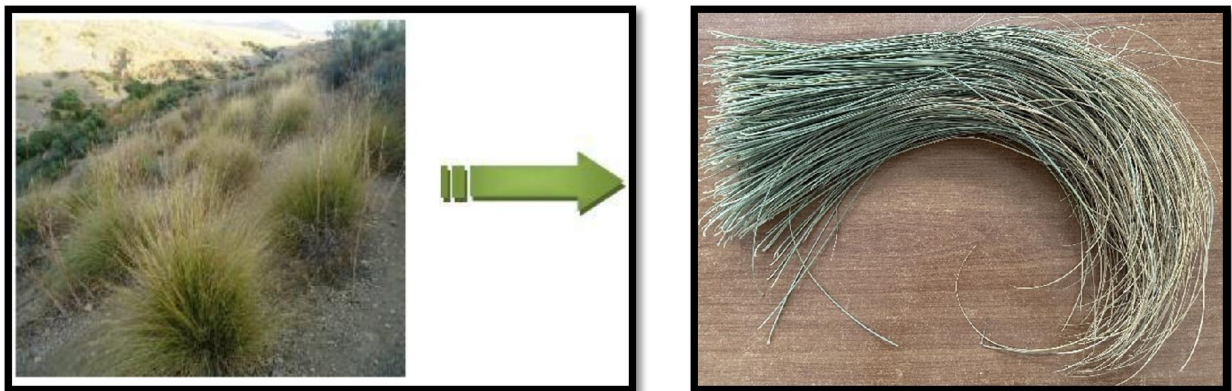


Figure II. 8 : La plante et les fibres l'Alfa [4].

Les fibres d'alfa se distinguent par leur longueur, leur finesse et leur résistance. Elles sont constituées d'environ 70 % de cellulose, 20 % de lignine et 10 % d'hémicellulose. La cellulose confère aux fibres leur résistance mécanique, tandis que la lignine leur confère leur rigidité [27].

Chapitre II : Etude des fibres naturelles végétales

Les fibres d'alfa sont largement utilisées dans une variété d'applications, notamment :

- Papier : Les fibres d'alfa sont appréciées pour la fabrication de papier de qualité supérieure, utilisé notamment dans la production de livres, de magazines et de documents officiels.
- Textiles : Elles sont également employées pour la confection de textiles durables et résistants, tels que des tapis, des sacs et des vêtements.
- Cordages : Les fibres d'alfa sont idéales pour la fabrication de cordages robustes et durables, utilisés dans la construction de cordes, de haubans et d'amarres.
- Tapis : Elles sont une matière de prédilection pour la fabrication de tapis résistants et durables, notamment les tapis traditionnels du Maroc et d'Algérie [30-31-32].
- La fabrication de matériaux de construction : Les fibres d'alfa peuvent être intégrées dans des matériaux de construction tels que le béton pour en renforcer la structure [31-32].

Les fibres d'alfa sont une ressource renouvelable et durable, offrant plusieurs avantages par rapport aux fibres synthétiques. Elles sont réputées pour leur résistance, leur durabilité et leur respirabilité, en plus d'être biodégradables et recyclables.

Ces fibres revêtent une grande importance pour les pays du Sahara et du Sahel, contribuant à leur économie locale et à la création d'emplois dans la région.

Tableau II. 1: Composition chimique d'Alfa [31].

Composants	[9]%	[11]%	[10]%	[19]%
Cellulose	43,81	45	45	47,63
Lignine	18,76	23	24	17,71
Cendres	4,66	2	2	5,12
Silica	1,76			
Hémicellulose /pectines	28,4	25	24	22,15
Cires		5	5	
Autres	2,61			7,39

II.5.2. Sisal

Le sisal est une fibre naturelle robuste et durable, extraite des feuilles de l'agave sisalana. Originaire du Mexique, son utilisation remonte au XIXe siècle. Les fibres de sisal sont caractérisées par leur longueur et leur finesse, mesurant environ 1 mètre de long et entre 0,2 et 0,4 millimètres de diamètre. Leur résistance à la traction et aux intempéries en fait un matériau polyvalent, adapté à diverses applications telles que la fabrication de tapis, de cordages, de fils et de matériaux de construction.

De nos jours, le sisal est de plus en plus utilisé comme renfort dans les matériaux composites, notamment dans l'industrie automobile. Les fibres de sisal peuvent être employées sous forme de fibres distribuées aléatoirement, de fibres longues ou même de tissus.

Ces fibres sont extraites de l'Agave sisalana, une plante xérophyte originaire du Mexique. Cette plante résiliente pousse toute l'année dans des climats chauds et arides, souvent inadaptés à d'autres cultures.

Chapitre II : Etude des fibres naturelles végétales

Elle s'adapte à la plupart des types de sols, à l'exception des sols argileux, très salins et humides. Sa culture est relativement simple car elle est résistante aux maladies.

Le sisal peut être récolté environ deux ans après sa plantation, et sa vie productive peut s'étendre jusqu'à 12 ans. Chaque plante peut produire entre 180 et 240 feuilles, selon des facteurs tels que la situation géographique, l'altitude, la pluviométrie et la variété (Figure.II.09) [33].



Figure II. 9: plante de sisal.

II.5.2.1. Extraction des fibres de sisal

L'extraction des fibres naturelles représente une étape cruciale dans la fabrication de matériaux composites, et les chercheurs s'efforcent de développer des méthodes d'extraction rentables et respectueuses de l'environnement.

Plusieurs techniques sont utilisées pour extraire les fibres de sisal. Parmi les plus courantes, on trouve les méthodes basées sur l'immersion de la plante dans l'eau, qui exploitent la biodégradation pour dissoudre les tissus non fibreux de la plante. Une autre approche consiste à recourir à des solutions chimiques, telles que des alcalins, pour dissoudre ces tissus et faciliter l'extraction des fibres. Enfin, il existe des méthodes mécaniques qui font appel à des machines ou à des grattoirs pour séparer les fibres des tissus non fibreux.

Dans l'étude citée, les chercheurs ont opté pour une méthode mécanique pour extraire les fibres de sisal. Ils ont écrasé les feuilles de sisal à l'aide d'un cube de bois afin de retirer l'enveloppe externe de la plante. Les fibres ont ensuite été immergées dans de l'eau pendant deux jours pour dissoudre les derniers tissus non fibreux. Enfin, les fibres ont été séchées à une température de 60 °C pendant cinq heures [34].

Chapitre II : Etude des fibres naturelles végétales

II.5.2.2. La composition chimique des fibres de sisal

En général, la composition chimique des fibres de sisal est approximativement comme suit : environ 70 % de cellulose, 12 % d'hémicellulose, 10 % de lignine, ainsi qu'une petite quantité de pectine, de cires et de graisse, représentant environ 2 % [35].

II.5.3. Jute

Le jute est une plante arbustive mesurant généralement de 2 à 4 mètres de hauteur, caractérisée par une tige rigide et fibreuse d'environ 2 cm de diamètre, avec des branches se ramifiant principalement dans la partie supérieure. Ses feuilles, portées par de longs pétioles, ont une forme triangulaire et mesurent généralement de 10 à 15 cm de long sur 5 cm de large. Originnaire du sud-est asiatique, le jute est principalement cultivé en Inde, au Bangladesh et en Chine (Figure.II.10) [35].



Figure II. 10: Jute (plant).

Les fibres de jute sont des fibres naturelles extraites de la plante jute (*Corchorus capsularis*). Elles occupent la deuxième place en termes de production mondiale de fibres naturelles, juste après le coton. Le jute est cultivé principalement dans les régions tropicales et subtropicales, notamment en Inde, au Bangladesh, au Pakistan et au Brésil (Figure.II.11).

Ces fibres de jute se distinguent par leur longueur, leur finesse et leur résistance. Elles sont largement utilisées dans la fabrication de divers produits tels que des sacs, des cordes, des tapis et des géotextiles. De plus, elles représentent une ressource renouvelable et durable. Leur coût est relativement bas et elles sont faciles à travailler, ce qui en fait un choix prisé dans de nombreuses applications (Figure.II.12) [36].

Chapitre II : Etude des fibres naturelles végétales



Figure II. 11 : Fibres de jute.



Figure II. 12: Fibres de jute.

II.5.3.1. Composition chimiques de la fibre de jute

Tableau II. 2: Composition chimiques de la fibre de jute à l'état naturel pourcentage en poids [36].

Cellulose	Hémicellulose	Lignine	Pectine	Cires	Eau
59 – 71,5	13,6 – 20,4	11,8 - 13	0,2 – 0,4	0,5	12,5 - 13,7

Tableau II. 3: Caractéristiques physiques de la fibre de jute à l'état nature [36].

Masse volumique (g/cm ³)	Longueur (mm)	Diamètre (μm)	Résistance à la traction (MPa)	Module de traction (GPa)	Module spécifique (N.m/kg)	Elongation (%)	Angle micro-fibrillaire (degré)
1,3 – 1,49	1,5 - 120	20 - 200	320 - 800	8 - 78	30	1 – 1,5	8

Chapitre II : Etude des fibres naturelles végétales

II.6. Méthodes d'extraction des fibres

Habituellement, pour être utilisées comme renfort dans les matériaux composites, les fibres végétales sont prélevées dans la chaîne de transformation de l'industrie textile. Cette industrie a développé, au fil des années, diverses techniques pour séparer les fibres du reste de la plante. Les méthodes couramment employées comprennent l'extraction mécanique, chimique et biologique des fibres [37].

II.6.1. Les prétraitements

Les prétraitements des fibres végétales consistent en des traitements chimiques ou mécaniques appliqués aux fibres avant leur transformation en textiles. Ils visent à éliminer les impuretés naturelles présentes sur les fibres, telles que la lignine, la cire, les pectines et les graisses. Ces impuretés peuvent entraver les processus de filature, de tissage et de teinture [32].

II.6.2. L'extraction mécanique

- ❖ **Teillage** : Cette méthode est utilisée pour séparer les fibres (ou tiges) des plantes telles que le lin ou le chanvre. Elle implique l'utilisation d'une action mécanique, notamment le broyage et le battage. Des machines automatisées, équipées de systèmes de roues cannelées à dentures grossières puis fines, sont employées pour engager, maintenir et dégager les tiges. Les fibres passent sous les cannelures des rouleaux avec un angle proche de 90° pour optimiser le broyage. Cette opération est réalisée successivement du côté du pied et du côté de la tête de la plante. Les fibres courtes, également appelées étoupes, ainsi que les résidus sont récupérés et séparés par aspiration [32].
- ❖ **Déflexion** : Cette méthode d'extraction des fibres combine le grattage et le battage. Les machines, appelées « raspadors » (grattoirs en espagnol), râpent les feuilles de la plante pour libérer les fibres. Ces machines sont principalement constituées d'un axe rotatif entraîné par un moteur, sur lequel des batteurs en acier sont fixés. Les tiges sont insérées à l'amont de la machine et prises entre les batteurs et une table à ciseaux, puis râpées et guidées vers le côté opposé. La poussière et les résidus de bois passent à travers des cribles. La distance entre les lames est ajustable en fonction des caractéristiques du lot de fibres [35].
- ❖ **Laminage** : Dans cette méthode, les tiges sont découpées en morceaux qui sont ensuite écrasés sous presse, par laminage ou par une combinaison des deux procédés. Cette opération est répétée plusieurs fois jusqu'à ce que les fibres soient suffisamment séparées.

II.6.3. L'extraction chimique

Plusieurs méthodes basées sur la séparation chimique de la cellulose des autres composants non cellulosiques sont décrites dans la littérature. Ces méthodes offrent l'avantage d'éviter les inconvénients de l'extraction mécanique, tout en permettant un gain de temps et d'énergie considérables. Voici les principales méthodes d'extraction chimique des fibres végétales [32-35-38] :

- ❖ **Procédé Kraft** : Le procédé Kraft est un traitement alcalin visant à éliminer la lignine, les pectines et les hémicelluloses sous l'action d'une solution d'hydroxyde de sodium (NaOH) et de sulfure de

Chapitre II : Etude des fibres naturelles végétales

sodium (Na_2S). Le sulfure de sodium, un agent réducteur, protège la cellulose et prévient son oxydation. La température de cuisson est généralement maintenue entre 170°C et 175°C pendant une durée de 2 à 4 heures.

- ❖ **Procédé au bisulfite** : Ce procédé permet de séparer la lignine des fibres de cellulose en utilisant divers sels de l'acide sulfureux. Les sels, tels que les sulfites (SO_3^{2-}) ou les bisulfites (HSO_3^-), sont choisis en fonction du pH. Ce procédé repose sur la réaction de l'hydrogénosulfite avec la lignine, et des sels de calcium, de sodium, d'ammonium ou de magnésium contenant de l'anhydride sulfureux libre. Le pH est généralement maintenu entre 1,5 et 5 (sulfites ou bisulfites), avec une durée de traitement allant de 4 à 14 heures et une température variant de 130°C à 160°C , selon la base utilisée.
- ❖ **Procédé acide** : Les composants non cellulosiques sont éliminés par l'action d'un acide fort, de préférence de l'acide sulfurique. L'acide transforme la lignine en acide lignosulfonique soluble, ou l'acide chlorhydrique, qui forme des chlorolignines solubles dans l'hydroxyde de sodium grâce à ses ions chlorates.
- ❖ **Procédé à la soude** : Ce procédé utilise uniquement de l'hydroxyde de sodium (NaOH) pour dissoudre les substances non cellulosiques telles que la lignine, la pectine et l'hémicellulose, ainsi que les différents constituants constituant la réserve et la paroi extérieure de la tige de plante. Les paramètres de traitement tels que la température, la pression, la concentration et la durée sont ajustés en fonction du lot, de l'âge et du type de la plante afin de prévenir la dégradation des fibres cellulosiques. Il est recommandé de contrôler le pH de la solution et de l'ajuster autour de 7, et des réducteurs peuvent être ajoutés pour éviter l'oxydation de la cellulose.

II.6.4. L'extraction biologique

- ❖ **Le rouissage à terre** : Le rouissage est un processus naturel visant à faciliter l'extraction des fibres. Il implique de disposer les tiges (telles que celles de lin) dans un champ après la récolte, permettant ainsi l'action combinée du soleil et de la pluie pour favoriser le développement de micro-organismes capables de séparer les éléments non cellulosiques de la partie fibreuse de la plante. Cette opération peut durer de 6 à 8 semaines selon les conditions météorologiques. Bien que cette méthode soit efficace, elle dépend entièrement des conditions climatiques, telles que l'humidité excessive ou les vents forts, ce qui la rend assez aléatoire [32].
- ❖ **Le rouissage à l'eau** : Cette méthode repose sur le même principe de développement de micro-organismes que le rouissage à l'air, mais les tiges (par exemple, celles de chanvre) sont immergées dans l'eau pendant plusieurs jours. Des bottes de 5 à 7 kg sont soumises à l'action de bactéries anaérobies. Une fois que les fibres se détachent sur toute leur longueur, la plante est retirée de l'eau pour être séchée. Bien que cette technique offre des résultats moins aléatoires que le rouissage à l'air, elle présente l'inconvénient majeur de la pollution de l'eau. Cette méthode est répandue dans les régions nordiques de l'Europe (France, Belgique, Pays-Bas), mais elle est en déclin au profit du rouissage à terre [35].
- ❖ **Par action microbienne** : Trois groupes d'agents microbiens sont capables de dégrader les composants non cellulosiques présents dans les tiges ou les feuilles des plantes : les bactéries, les protozoaires et les champignons. Les bactéries ont différentes activités, notamment la

Chapitre II : Etude des fibres naturelles végétales

dépolymérisation et l'hydrolyse des hémicelluloses. Les protozoaires peuvent dépolymériser les hémicelluloses et les substances pectiques, mais ont une capacité limitée à utiliser les produits d'hydrolyse comme source d'énergie. Les champignons peuvent dépolymériser les hémicelluloses, utiliser les oligosaccharides et les oses libérés, mais ne peuvent pas dépolymériser les pectines [38].

II.7. Utilisation des fibres végétales : avantages et inconvénients

II.7.1. Avantage

- ❖ Faible coût : Les fibres végétales présentent un avantage économique notable, étant généralement moins coûteuses à produire que les alternatives synthétiques [39].
- ❖ Propriétés mécaniques spécifiques importantes (résistance et rigidité) : Les fibres végétales offrent des propriétés mécaniques telles que la résistance et la rigidité, qui les rendent adaptées à diverses applications industrielles [40].
- ❖ Biodégradabilité : Les fibres végétales sont biodégradables, ce qui signifie qu'elles se décomposent naturellement avec le temps, réduisant ainsi leur impact sur l'environnement en fin de vie [41].
- ❖ Non abrasif pour les outillages : Contrairement à certains matériaux abrasifs, les fibres végétales sont douces et non abrasives pour les outils et les équipements utilisés lors de leur transformation.
- ❖ Neutre pour l'émission de CO₂ : La production et l'utilisation de fibres végétales génèrent généralement moins d'émissions de dioxyde de carbone (CO₂) par rapport aux matériaux synthétiques, contribuant ainsi à la réduction des impacts environnementaux.
- ❖ Faible demande en énergie pour la production : La fabrication des fibres végétales nécessite souvent moins d'énergie que celle des matériaux synthétiques, ce qui peut réduire la dépendance aux ressources énergétiques non renouvelables.
- ❖ Pas de résidus après incinération : Les fibres végétales ne laissent généralement pas de résidus nuisibles après leur incinération, ce qui peut contribuer à la gestion écologique des déchets.
- ❖ Pas d'irritation cutanée lors de la manipulation des fibres : Les fibres végétales sont souvent moins irritantes pour la peau que certains matériaux synthétiques, ce qui les rend plus sûres et plus confortables à manipuler.
- ❖ Bonne isolation thermique et acoustique : Les fibres végétales offrent généralement de bonnes propriétés d'isolation thermique et acoustique, ce qui les rend utiles dans la construction et d'autres applications nécessitant une isolation.
- ❖ Résistance au feu : Certaines fibres végétales, comme le chanvre, présentent une résistance naturelle au feu, ce qui peut améliorer la sécurité dans certaines applications.
- ❖ Ressource renouvelable : Les fibres végétales proviennent de sources renouvelables telles que les plantes, ce qui signifie qu'elles peuvent être régénérées sur une base continue sans épuiser les ressources naturelles.

II.7.2. Inconvénients

- ❖ Absorption d'eau : Les fibres végétales ont tendance à absorber l'eau, ce qui peut affecter leurs propriétés physiques et mécaniques, ainsi que leur durabilité dans certaines conditions.

Chapitre II : Etude des fibres naturelles végétales

- ❖ Faible stabilité dimensionnelle : En raison de leur sensibilité à l'absorption d'eau, les fibres végétales peuvent présenter une faible stabilité dimensionnelle, ce qui peut entraîner des variations de taille ou de forme dans certains environnements.
- ❖ Biodégradabilité : Bien que la biodégradabilité puisse être considérée comme un avantage, elle peut également être un inconvénient dans certaines applications où une durabilité à long terme est nécessaire.
- ❖ Faible tenue thermique (20 à 30°C max) : Les fibres végétales ont généralement une faible résistance à la chaleur, ce qui limite leurs applications dans des environnements à haute température.
- ❖ Fibres anisotropes : Les fibres végétales ont une structure anisotrope, ce qui signifie qu'elles présentent des propriétés différentes selon la direction dans laquelle elles sont mesurées, ce qui peut affecter leur comportement dans les applications où une uniformité est requise.
- ❖ Variation de qualité en fonction du lieu de croissance, de la météo : La qualité des fibres végétales peut varier en fonction de divers facteurs tels que le lieu de croissance, les conditions météorologiques et les pratiques agricoles, ce qui peut rendre la standardisation difficile dans certaines industries.
- ❖ Demande de gestion de stock pour des applications industrielles : En raison de la variabilité de qualité et de la nature périssable des fibres végétales, leur utilisation dans des applications industrielles peut nécessiter une gestion de stock efficace pour assurer un approvisionnement constant et cohérent.

II.8. Conclusion

L'incorporation des fibres végétales à des fins industrielles offre plusieurs avantages significatifs. Elle permet tout d'abord de réduire les coûts de production et le poids des pièces, ce qui peut être particulièrement avantageux dans des secteurs comme l'automobile, où la légèreté des matériaux est cruciale pour améliorer l'efficacité énergétique et les performances des véhicules. De plus, l'utilisation de fibres végétales offre des perspectives prometteuses en matière de recyclage et réduit l'impact environnemental global des produits finis, ce qui est de plus en plus important dans un contexte de durabilité croissante.

Dans le domaine de la construction, l'intégration de fibres végétales présente des avantages économiques et techniques considérables. Ces fibres offrent en effet des niveaux d'isolation thermique nettement supérieurs à ceux des matériaux traditionnels, ce qui permet de réaliser des économies d'énergie significatives et d'améliorer le confort thermique des bâtiments. En outre, leur utilisation peut contribuer à réduire les émissions de gaz à effet de serre associées à la construction et à favoriser des pratiques de construction plus durables et respectueuses de l'environnement.



Chapitre III : Matériaux utilisés et techniques expérimentales

Chapitre III : Matériaux utilisés et techniques expérimentales

III.1. Introduction

L'objectif de ce chapitre est, en premier lieu, de présenter les matériaux utilisés et d'expliquer la technique expérimentale d'élaboration des composites UPR/fibres Alfa traité et no traité. Les composites UPR/fibres Alfa ont été réalisés à des taux variables de fibres : 10, 15, 20, 25 et 30pcr (Partie pour Cent Partie de la Résine) présentant une longueur moyenne de 3mm.

III.2. Matériaux utilisés

III.2.1. Résine polyester insaturé

La résine polyester insaturée utilisée dans cette étude est de type isophtalique. Elle est fournie par la société Exxon Mobil Chemical sous forme d'un mélange peu visqueux, avec une viscosité d'environ 373 mPa·s à 25°C.

Cette résine est livrée sous forme de prépolymère accéléré, ce qui signifie qu'elle est présentée sous forme liquide et contient entre 30 et 50 % en poids de monomère insaturé, principalement du styrène, ainsi que 0,25 % en volume d'accélérateur. Les propriétés de la résine polyester insaturée sont résumées dans le tableau III.1.

Tableau III. 1: Caractéristiques générales de la résine polyester insaturé.

Propriétés	Unité	Valeur
Densité	g/ml	1,11
Viscosité Brookfield à 25 °C	mPa.S	373
Teneur en styrène	%	39,5
Valeur acide	mg KOH/g	15,8

III.2.2. Système catalytique catalyseur/accélérateur

L'initiateur de la réaction de copolymérisation utilisé est le P MEC. La quantité d'initiateur ajoutée dépend de la température de travail et est ajustée selon les recommandations des fiches techniques des fournisseurs, généralement comprise entre 1 et 1,5 %. Pour accélérer la réaction de durcissement de la résine, l'accélérateur utilisé est l'octoate de cobalt.

III.2.3. Fibres d'Alfa

La fibre végétale Alfa a été introduite dans le premier chapitre. Elle se présente généralement sous forme de feuilles enroulées de manière circulaire ou parfois elliptique.

Dans notre étude, la fibre Alfa utilisée est originaire de Bousaada, située dans la région de Msila (Figure.III.1).



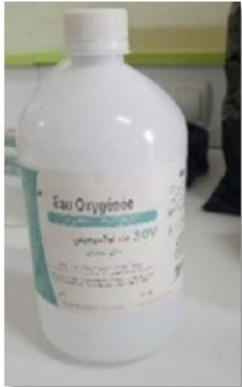
Chapitre III : Matériaux utilisés et techniques expérimentales



Figure III. 1: Fibre d'Alfa.

III.2.4. Produit chimique utilisés

Tableau III. 2: Les produits utilisés.

L'hydroxyde de sodium		
Formule chimique	NaOH	
Masse molaire	$M = 40 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$	
Etat et couleur	solide de formes variables, blanc	
L'acide acétique		
Formule chimique	$\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_2$	
Masse molaire	$M = 60.04 \text{ g/mol}$	
Etat et couleur	liquide incolore	
Densité (à 20°C)	1.0480 à 1.051	
Hydrogène Peroxyde		
Formule chimique	H_2O_2	
Etat et couleur	liquide incolore	
Densité	1.45 g/cm^3	

III.3. Elaboration de composites à matrice UPR

III.3.1. Protocole de traitement des fibres

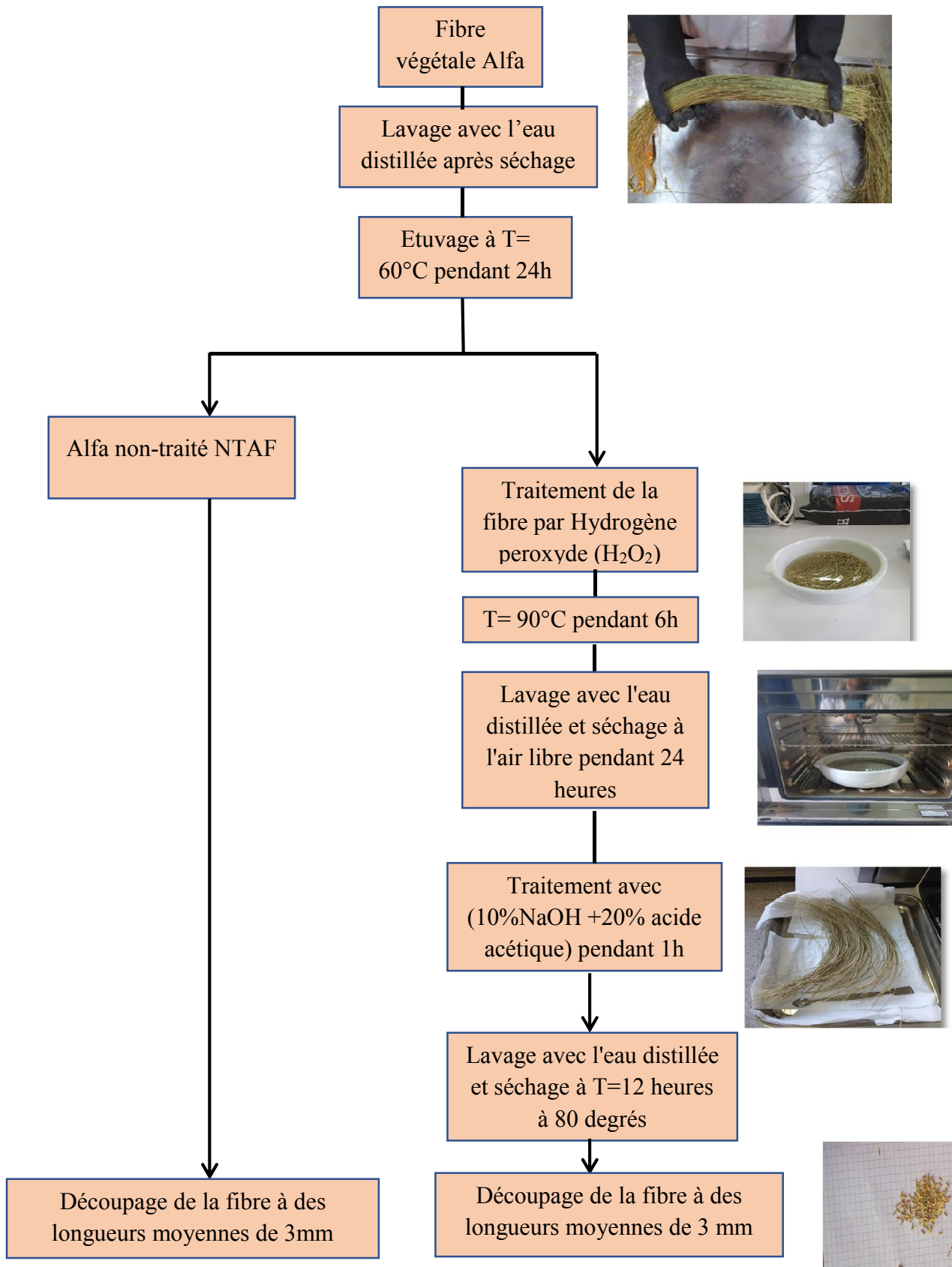


Figure III. 2: Organigramme de traitement des fibres d'Alfa.

Chapitre III : Matériaux utilisés et techniques expérimentales

III.3.2. Composites UPR/fibres Alfa traité et no traité

III.3.2.1. Découpage les fibres d'Alfa

Après le séchage des échantillons d'Alfa traité et non traité, nous les avons coupés à une longueur de 3 mm (Figure.III.3).



Figure III. 3 : Découpage les fibres d'Alfa en longueur de 3mm.

III.3.2.2. Préparation des moules

Nous préparons des moules en bois selon les indications de la Figure 4. Chaque moule a des dimensions de 155 mm sur 250 mm (Figure.III.4).

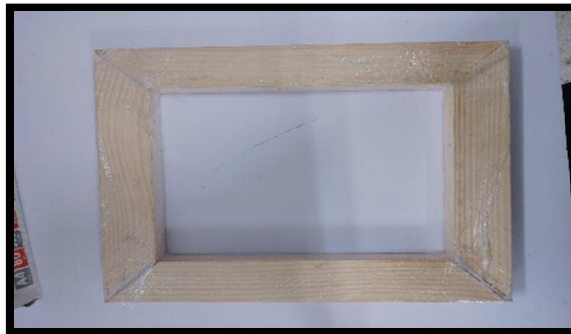


Figure III. 4: Moule en bois utilisé durant l'élaboration.

III.3.2.3. Préparation des composites

La technique utilisée dans ce travail est le moulage au contact. Le moulage au contact est le procédé le plus utilisé pour la mise en œuvre des composites. Le moulage est réalisé à température ambiante. Dans cette étape, la quantité de résine accélérée est soigneusement pesée de façon à préparer des plaques de composites ayant une épaisseur de 5mm, en utilisant des moules en bois ayant les dimensions (155 x 250) mm². La résine polyester insaturé accélérée est mélangée doucement dans un récipient métallique. Ensuite, la fibre est ajoutée avec les taux suivants : 10, 15, 20 et 25pcr est mélangée aléatoirement à la résine.

Une concentration de 1,5pcr de PMEC est ajoutée, en dernier, pour assurer la réticulation de la matrice du composite. Enfin, la formulation, ainsi préparée, est versée dans le moule en bois posé sur une feuille de téflon. La bonne répartition de la formulation liquide sur toute la surface du moule est

Chapitre III : Matériaux utilisés et techniques expérimentales

assurée au moyen d'un ébulleur qui permet à la fois de dégager les inclusions de bulles d'air pouvant être induites lors de l'opération de mélangeage, et d'améliorer l'état de surface de la plaque. Les plaques de résine non chargée et de composites chargés avec Alfa traité et non traité, ainsi élaborées, sont laissées durcir pendant 24h à la température ambiante, puis mises en étuve pendant 16h à 40°C pour une post cuisson (Figure.III.5).

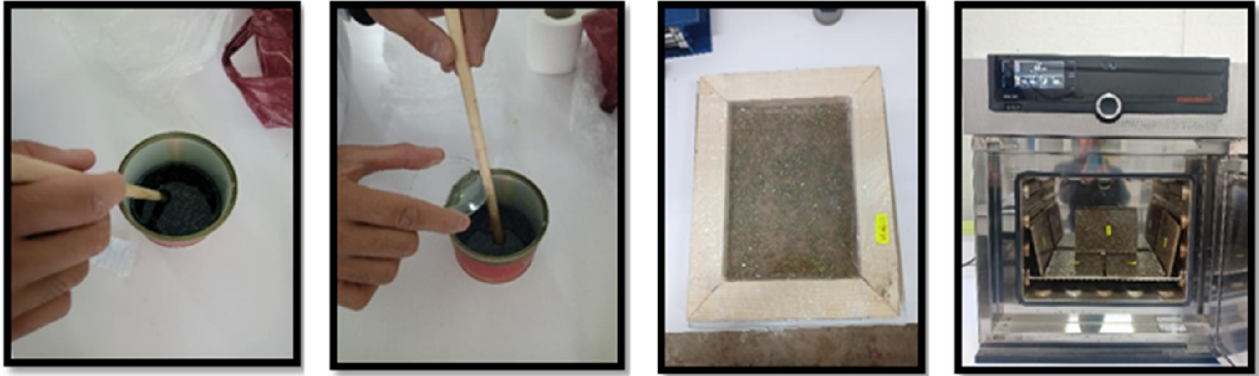


Figure III. 5: Etapes de préparation des composites.

III.4. Techniques expérimentales

III.4.1. Préparation des échantillons et essais de caractérisation

A partir des plaques obtenues à partir de la résine pure et des composites UPR/fibres d'Alfa traité et non traité, des éprouvettes rectangulaires destinées aux essais mécaniques sont usinées aux dimensions requises à l'aide d'une coupeuse diamantée. Pour limiter tout échauffement induit par l'usinage, des vitesses d'avance et des profondeurs de passe modérées sont adoptées. Ce protocole garantit l'obtention d'éprouvettes présentant une surface de très bonne qualité, un paramètre essentiel pour réaliser des essais mécaniques précis.

III.4.2. Essais mécaniques

III.4.2.1. Essai de traction

L'essai de traction est effectué sur une machine de flexion universelle avec les dispositifs de l'essai de traction (Figure III.6), la vitesse de sollicitation est de 2 mm/min et un maximum de la charge de 20KN. Les éprouvettes de forme rectangulaire découpées de plaquettes d'Alfa/polyester et Alfa traité/polyester, leurs dimensions sont recommandées par les normes.

ASTM D5083 [42], ASTM D3039 [43]. L'essai de traction permet de déterminer la loi de comportement contrainte – déformation dans une direction donnée.

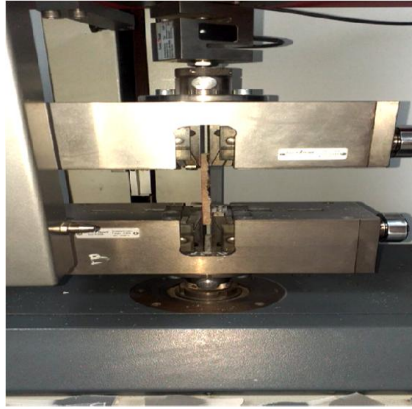


Figure III. 6: Dispositif d'essai de traction.

La figure III.7 montre la géométrie des éprouvettes utilisées en traction.

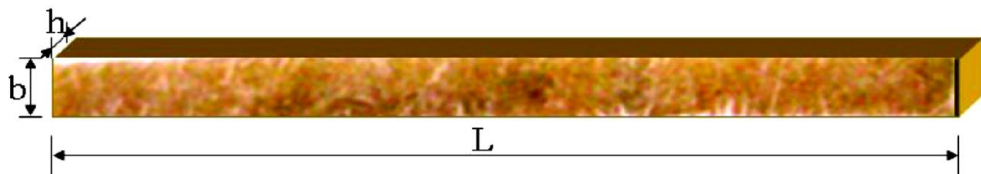


Figure III. 7: Éprouvettes utilisées en traction.

La contrainte à la rupture en traction est donnée par la formule suivante :

$$\sigma_r = \frac{P}{S} \text{ (MPa)}$$

P : la force appliquée à l'éprouvette au moment de rupture.

S : la section de l'éprouvette, $S = b.h$.

Le module d'Young est donné par la loi de Hooke :

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \text{ (MPa)}$$

σ : la contrainte de traction.

ε : la déformation qui correspond à la contrainte de traction.

III.4.2.2. Essai de résistance au choc (résilience IZOD)

L'essai de résistance au choc nous permet de calculer la résistance (l'énergie consommée lors de la rupture forcée) du produit fini. La méthode la plus courante est connue sous la référence IZOD (ISO 180) (Figure.III.8). Ce test permet de mesurer la perte d'énergie d'un pendule qui lâché en chute libre sur son chemin engendrant la rupture d'une éprouvette en une fraction de seconde, nous pouvons également conclure de ce test la fragilité ou ductilité des matériaux.

L'essai de résistance au choc qui suit la norme ASTM D-256 est réalisé à l'aide d'un appareil de marque CEAST type Resil Impactor, par l'application d'une sollicitation mécanique à grande vitesse de percussion avec une énergie élevée, engendrant la rupture d'une éprouvette en une fraction de seconde.

Chapitre III : Matériaux utilisés et techniques expérimentales

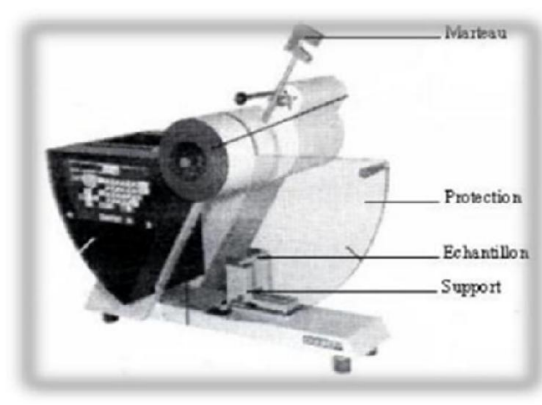


Figure III. 8 : Appareillage pour le calcul de la résilience selon l'essai IZOD [44].

➤ Protocole expérimental pour le calcul de la résilience Izod

Le test d'impact permet de mesurer la résistance au choc d'un matériau et ainsi estimer sa ténacité. Le dispositif utilisé est appelé « mouton pendule » de capacité maximale de 5 Joules. Libéré d'une certaine hauteur, le pendule sert à rompre l'éprouvette tout en continuant son mouvement jusqu'à atteindre une hauteur inférieure à la hauteur initiale.

A partir d'une plaque de 3 mm d'épaisseur on confectionne des échantillons de dimensions : $L = 100$ mm et $l = 12,7$ mm sur lesquels une entaille centrale (en V) de 2,5 mm de profondeur est réalisée. Les figures III.9-a et III.9-b montrent les éprouvettes avant et après le test. Pour un souci de reproductibilité des résultats, trois essais sont réalisés et la valeur moyenne est retenue.

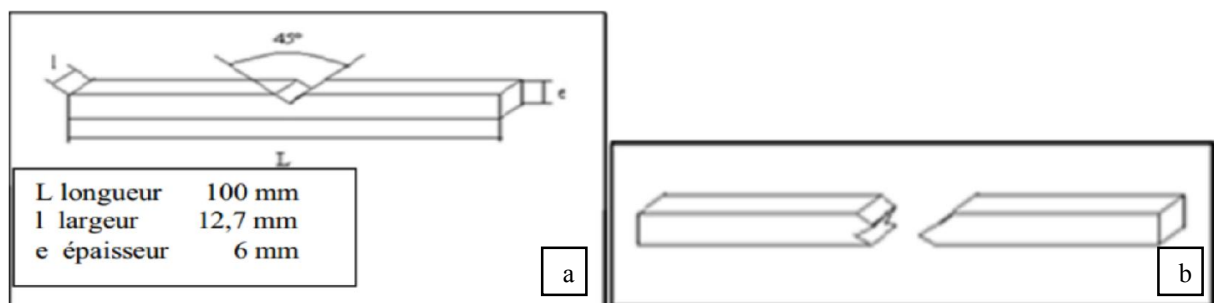


Figure III. 9: a- Eprouvette avant le test. b- Eprouvette après le test.

III.4.2.3. Test de la dureté (Dureté Shore)

La dureté est la mesure de la résistance d'un matériau à la pénétration d'un corps dur. Une technique très simple et efficace.

Le principe de cet essai est la mesure de l'entaille provoquée par l'application d'une bille en acier ou d'un cône en diamant sous une charge standard. Des dispositifs de pénétration de tailles différentes sont employés pour les différentes gammes de dureté.

C'est une propriété complexe à mesurer qui exprime la résistance à la déformation. Elle est normalement déterminée selon des méthodes légèrement modifiées initialement employées dans les essais des métaux, les normes applicables étant la norme ASTM D-2240 [45]. Il existe quelque type de la dureté shore : shore A, shore D, shore C, et O, dans ce cas nous utiliserons la dureté du shore D. Cette dureté est mesurée sur une échelle de 0 à 100. Plus le nombre est élevé, plus le matériau est dur (Figure.III.10).



Figure III. 10: Appareillage de mesure de la dureté Shore D.

➤ Protocole expérimental

Selon la norme ASTM D-2240 les échantillons en plaque de 3-2 mm d'épaisseur sont préparés à l'aide de la presse, puis placés sous l'aiguille. En agissant sur le bras du levier jusqu'à pénétration de l'aiguille on peut lire la valeur indiquée par celle-ci. Trois essais sont réalisés en différents points, puis la moyenne est calculée.

La valeur de la dureté n'est lue qu'après la stabilisation de l'aiguille, trois mesures ont été effectuées sur chaque échantillon dans des points distants d'environ 3 mm les uns des autres et environ 12 mm des bordures de l'échantillon. Les résultats sont exprimés par la moyenne des trois valeurs d'essais.

III.4.3. Essais physiques

III.4.3.1. Mesure de la densité des composites

Les mesures de la densité (d) ont été effectuées, sur des fragments de la résine et des composites, selon la norme ISO 1183, méthode A [46], conçue pour les matériaux possédant une densité supérieure à 1. La réalisation de l'essai a consisté aux étapes suivantes (Figure.III.11) :

- 1- Préparer le pycnomètre.
- 2- Tarer la balance.
- 3- Prendre un échantillon dont le poids varie de 1 à 5g.
- 4- Mettre l'échantillon sur la corbeille, et enregistrer la masse w_a .
- 5- Tarer la balance à nouveau puis immerger l'échantillon dans le liquide d'immersion.
- 6- Enregistrer la masse volumique selon la formule suivante :

$$d = \frac{w_a \cdot \rho(\text{fl})}{w_a - w_{\text{fl}}} + 0.0012 \text{g/cm}^3$$

Où :

$\rho(\text{fl})$: masse volumique du liquide d'immersion exprimée en g/cm^3 (dans notre cas c'est l'eau

Chapitre III : Matériaux utilisés et techniques expérimentales

$$\rho(\text{fl})=1\text{g/cm}^3$$

w_a : poids de l'échantillon dans l'air, exprimé en g

w_{fl} : valeur absolue de la poussée hydrostatique, exprimé en g

$0,0012\text{ g/cm}^3$ = masse volumique de l'air dans les conditions normales.



Figure III. 11 : Mesure de la densité.

III.4.3.2. Test d'absorption d'eau

Le problème d'affinité des fibres naturelles avec l'eau intervient négativement sur les propriétés des composites polymères/ fibres naturelles (Figure.III.12).

- ✚ Pour éliminer la quantité d'eau retenue, il y a lieu de sécher des éprouvettes carrées, dans une étuve pendant 2 h à 80 °C, pour se débarrasser de l'humidité. On les laisse refroidir jusqu'à la température ambiante et on les pèse (m_0) avec une balance analytique de précision 0,0001 g.
- ✚ Ensuite on immerge les éprouvettes dans un récipient d'eau distillée à une température ambiante. Chaque 24 h, on fait un prélèvement, on enlève toute l'eau superficielle avec du papier absorbant.
- ✚ On pèse de nouveau les éprouvettes (m).

Pour chaque éprouvette, on a calculé le Taux d'absorption d'eau en pourcentage à l'aide de la formule appropriée suivante :

Taux d'absorption d'eau (%) :

$$\Delta m (\%) = [(m - m_0) / m_0] \cdot 100$$

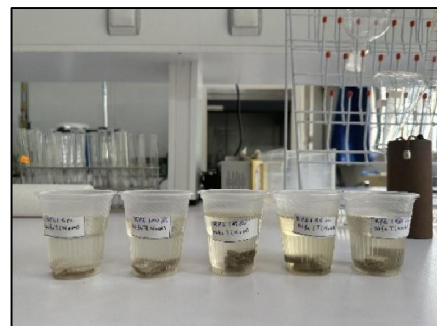
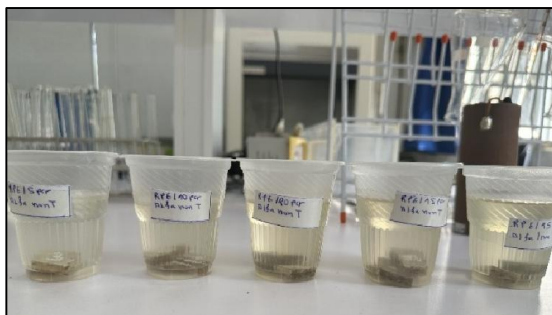


Figure III. 12 : Mesure de l'absorption d'eau.

Chapitre III : Matériaux utilisés et techniques expérimentales

III.4.4. Spectroscopie Infra Rouge à Transformée de Fourier (FTIR)

La spectroscopie IRTF est une des méthodes les plus efficaces pour l'identification des molécules organiques et inorganiques à partir de leurs propriétés vibrationnelles. En effet, le rayonnement infrarouge excite des modes de vibration (déformation, élongation) spécifiques et caractéristiques des liaisons chimiques, la comparaison entre le rayonnement incident et celui transmis par l'échantillon permet de déterminer les espèces chimiques qu'il contient (Figure.III.13).

La région infrarouge se divise en trois parties : le proche IR ($15600- 4000 \text{ cm}^{-1}$), le moyen ($4000- 400 \text{ cm}^{-1}$) et l'IR lointain ($400- 40 \text{ cm}^{-1}$). Chacune de ses trois parties nécessite l'usage de sources, systèmes de détection et diviseurs de faisceaux spécifiques. Le domaine infrarouge entre 4000 et 400 cm^{-1} correspond au domaine de vibration des molécules.

Les informations tirées des spectres sont de deux sortes :

- ❖ **Informations qualitatives** : les longueurs d'onde auxquelles l'échantillon absorbe, sont caractéristiques des groupes chimiques présents dans le matériau analysé. Des tables de données permettent d'attribuer les absorptions aux différents groupes chimiques présents.
- ❖ **Informations quantitatives** : l'intensité de l'absorption à la longueur d'onde caractéristique est reliée à la concentration du groupe chimique responsable de l'absorption.



Figure III. 13: Spectrophotomètre à transformée de Fourier de type Perkin Elmer FT-IR spectromètre.

III.5. Conclusion

Au cours de ce chapitre, nous avons détaillé les matériaux employés dans cette étude en précisant les propriétés, les proportions et les quantités de chacun d'entre eux au sein du matériau composite. De plus, nous avons exposé le traitement appliqué aux fibres d'alfa, la méthodologie de préparation des échantillons ainsi que les diverses expériences et tests effectués sur ces derniers.



Chapitre IV : **Résultats et discussion**

Chapitre IV : Résultats et discussion

IV.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous allons examiner les éprouvettes préparés et utilisés pour mener à bien les essais physiques et mécaniques. Ensuite, nous interpréterons les caractéristiques mécaniques résultant de ces essais, notamment l'absorption d'eau, la densité, la résistance à la traction, la résistance aux chocs et la dureté.

IV.2. Analyse de spectroscopie infrarouge

L'efficacité des traitements chimiques sur les fibres a été étudiée par FTIR en comparant les spectres IR des fibres avant et après chaque traitement (Figure IV.1).

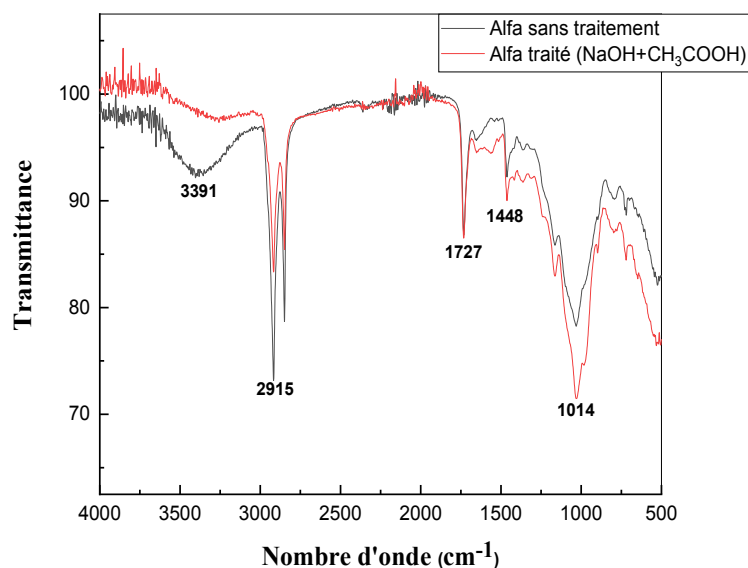


Figure IV. 1: Spectres IRTF du l'Alfa non traité et traité par NaOH+ CH₃COOH.

D'après la figure IV.1, la fibre d'alfa est principalement composée de cellulose, d'hémicellulose, de lignines et de certaines pectines. Sur le spectre des fibres non traitées, la liaison glycosidique C – O – C de la cellulose a été détectée par une bande d'absorption s'étendant jusqu'à 1100 cm⁻¹. Les pics à 1056 cm⁻¹ et 1030 cm⁻¹ correspondaient respectivement au C-OH du squelette cellulosique (alcools secondaires C – O et primaires C – O). Tous les pics ayant des nombres d'onde supérieurs à 3000 cm⁻¹ proviennent des groupes hydroxyle (-OH). Ces groupes peuvent provenir de plusieurs composants qui possèdent un ou plusieurs groupes hydroxyle dans leur structure. L'intensité de ces pics est clairement plus élevée pour la fibre d'Alfa traitée.

Il est probable que la présence de soude (NaOH) résiduelle soit responsable si les fibres ne sont pas correctement rincées après le traitement. Ensuite, le petit pic et les deux grands pics entre 3000 cm⁻¹ et 2800 cm⁻¹ indiquent la présence des groupes -CH et -CH₂ de la cellulose avec l'étirement antisymétrique à 2850 cm⁻¹ et l'étirement symétrique. L'intensité de ces pics est plus élevée pour la fibre d'alfa brute, cependant, comme la spectroscopie IRTF-RTA n'est pas quantitative, il est difficile de tirer des conclusions précises concernant le taux de cellulose. Les nombres d'onde caractéristiques de la lignine se situent à 1650 cm⁻¹, entre 1510 cm⁻¹ et 1450 cm⁻¹ et près de 700 cm⁻¹. L'intensité du

Chapitre IV : Résultats et discussion

pic à 1650 cm^{-1} et près de 700 cm^{-1} est plus élevée pour la fibre d'alfa traitée que pour la fibre d'alfa brute, mais entre 1510 cm^{-1} et 1450 cm^{-1} , c'est l'inverse.

La présence des pics de lignine dans le spectre de la fibre d'alfa traitée démontre que les fibres contiennent encore de la lignine. Les pectines se situent autour de 1730 cm^{-1} où l'intensité des deux spectres est plus ou moins identique, bien que le pic des pectines soit moins net. Cependant, ce pic confirme néanmoins la présence de pectines résiduelles. Entre 1450 cm^{-1} et 1000 cm^{-1} , on observe d'autres pics de cellulose. Globalement, les intensités pour la fibre d'alfa traitée sont supérieures à celles de la fibre d'alfa brute. Les pics à 1360 cm^{-1} et 1320 cm^{-1} sont liés à la déformation de la cellulose, tandis que ceux à 1059 cm^{-1} et 1030 cm^{-1} correspondent à la vibration de la chaîne cellulosique.

La figure IV.2, présente FTIR de la résine polyester insaturé.

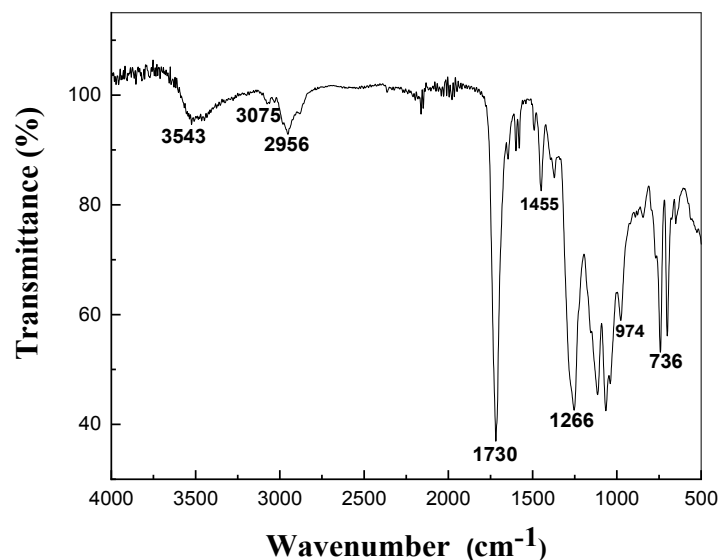


Figure IV. 2 : Spectres IRTF de la résine polyester UPR.

Le spectre FTIR de la résine polyester insaturée, représenté par la figure IV.2, met en évidence la présence de groupements OH (une large bande de vibration à 3543 cm^{-1}). Les vibrations d'élongation des groupes CH aromatiques sont observées entre 3075 et 3030 cm^{-1} , tandis que celles des groupes CH aliphatiques sont détectées à 2956 cm^{-1} . La présence du groupement carbonyle C=O du polyester est détectée à 1730 cm^{-1} , tandis que les bandes de vibrations des groupes C=C sont observées entre 1600 et 1400 cm^{-1} .

Les bandes situées autour de 3650 et 3250 cm^{-1} correspondent à la fonction alcool. La liaison C-O du polyester est détectée à 1266 cm^{-1} .

La figure IV.3 présente le spectre FTIR des composites UPR/fibres d'Alfa non traitées, traitées par le (NaOH) et traité par (NaOH+CH₃COOH).

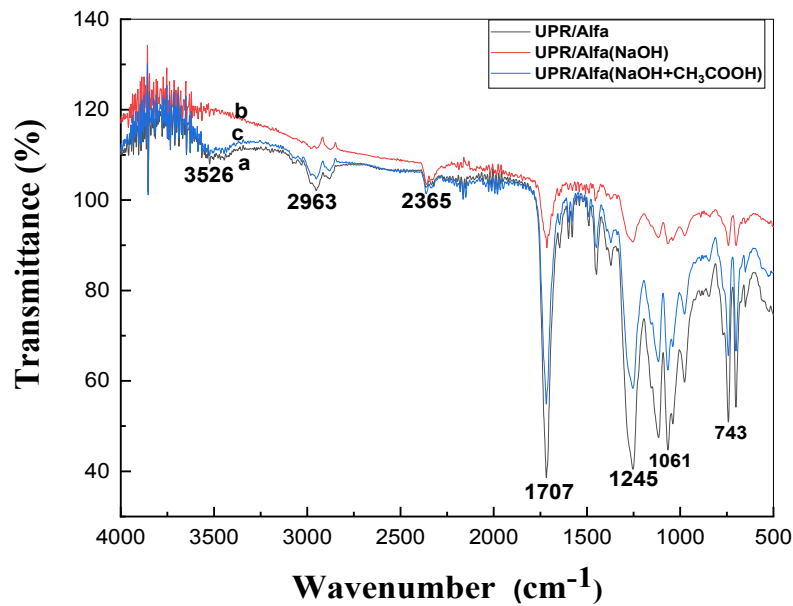


Figure IV. 3: Spectres IRTF du : a) composite UPR/Alfa non traité, b) composite UPR/Alfa traité par (NaOH) et c) composite UPR/Alfa traité par (NaOH+ CH₃COOH).

Les spectres FTIR présentés dans la figure IV.3 caractérisent les composites UPR/fibres d'Alfa non traitées, traitées au (NaOH) et traitées au (NaOH+CH₃COOH). L'analyse de ces spectres révèle la présence de plusieurs pics caractéristiques. Les pics situés entre 1040 cm⁻¹ et 1080 cm⁻¹ correspondent à la vibration de la liaison C-O-C, tandis que l'étirement symétrique à 1065 cm⁻¹ est associé à la liaison C-O-C. Le pic à 1430 cm⁻¹ est attribué à la bande d'absorption du groupe CH₂ de la cellulose. L'examen des spectres présentés dans la figure IV.1 confirme que les pics pour les fibres d'Alfa non traitées et traitées présentent des intensités différentes. La diminution des intensités maximales après le traitement au (NaOH+CH₃COOH) indique l'élimination de l'hémicellulose et de la lignine des fibres non traitées. De plus, le traitement des fibres avec (NaOH+CH₃COOH) a conduit à l'apparition de pics d'absorbance supplémentaires entre 1707 et 1715 cm⁻¹ et à 1250 cm⁻¹.

IV.3. Caractérisation mécanique

IV.3.1. Essai de traction

Les variations des caractéristiques en traction, telles que la contrainte et la déformation à la rupture, en fonction du taux de fibres d'Alfa traité et non traité sont représentées respectivement par les figures IV.4 et IV.5.

A. Effet du taux de fibres

Les propriétés mécaniques des composites dépendent de plusieurs facteurs, telles que la dispersion des fibres, la quantité d'air emmagasinée dans le composite durant le mélangeage et l'absorption d'eau.

Cependant, selon S. Th. Georgopoulos et al, il convient de souligner que l'interface entre la fibre et la matrice joue un rôle critique dans la contribution de chaque élément du composite aux propriétés

Chapitre IV : Résultats et discussion

finales du matériau. La résistance des composites à fibres courtes dépend de l'adhésion à l'interface, tandis que le module dépend de l'orientation des fibres. Enfin, un autre facteur influençant les propriétés de rupture (résistance et allongement) est le facteur de forme [47-48].

D'après la figure IV.4, qui illustre les variations de la contrainte à la rupture en fonction du taux de fibres d'alfa non traité, nous avons observé une augmentation notable de la contrainte à la rupture pour les composites renforcés avec 15 et 20pcr de fibres d'Alfa, suivie d'une diminution pour les taux les plus élevés, notamment 25 et 30pcr. Lorsque les fibres sont présentes en faibles proportions, elles sont bien dispersées dans la matrice UPR, ce qui entraîne une plus grande surface de contact entre la matrice et les fibres, favorisant ainsi des interactions plus fortes et un meilleur transfert de contraintes entre les deux phases du composite [49-50].

Effectivement, cependant, lorsque les fibres d'Alfa sont introduites à des concentrations plus élevées, elles ont tendance à s'agglomérer en raison de la favorisation des interactions fibre/fibre. En raison du manque de mouillabilité des fibres par la matrice, des défauts apparaissent dans le matériau, ce qui entraîne un mauvais transfert de contrainte et une rupture fragile des composites.

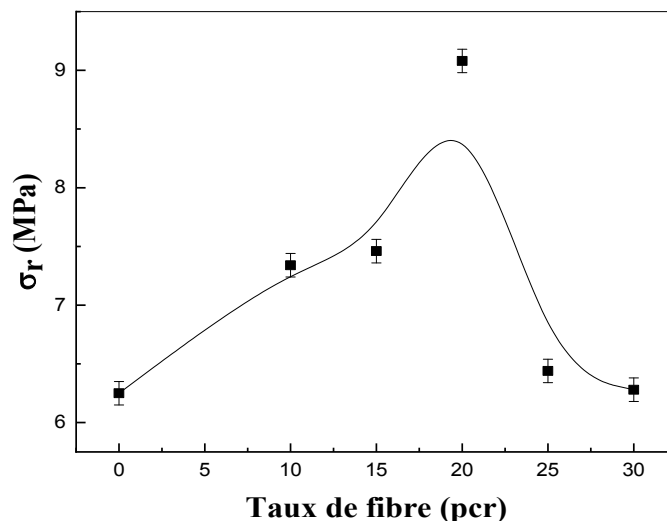


Figure IV. 4: Variations de la contrainte à la rupture des biocomposites résine polyester (UPR)/ fibre d'Alfa non traité en fonction du taux de fibre.

D'après la figure IV.5, une augmentation significative de la déformation à la rupture est observée, passant d'une valeur de 4,5% pour la résine UPR non chargée à 7,2% pour les composites renforcés par 15pcr de fibres d'Alfa. Ensuite, une diminution de la déformation à la rupture est notée pour les composites contenant 25pcr et 30pcr de fibres d'Alfa. Néanmoins, il est important de souligner que même si les propriétés en traction des composites renforcés par 25pcr et 30pcr de fibres d'Alfa ont diminué par rapport à celles des composites à des taux de renfort inférieurs, elles restent supérieures à celles de la matrice non chargée. Ceci met en évidence la contribution significative des interactions entre la matrice et la fibre à augmenter la résistance mécanique des systèmes UPR/fibres d'Alfa [48].

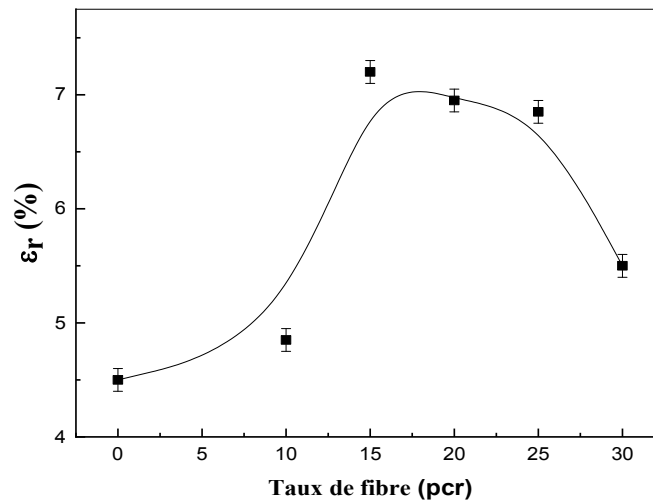


Figure IV. 5: Variations de la déformation à la rupture des biocomposites résine polyester (UPR)/ fibre d'Alfa non traité en fonction du taux de fibre.

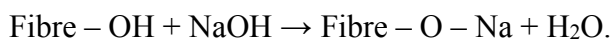
B. Effet du traitement chimique

Les modifications chimiques apportées à la fibre végétale d'Alfa visent à améliorer l'adhésion avec les matrices polymériques. Dans notre cas, nous avons effectué un traitement chimique avec une solution de 10 % de NaOH et 20 % d'acide acétique. Ce traitement chimique est couramment utilisé pour le traitement des fibres naturelles.

D'après la figure IV.6, qui présente la variation de la contrainte à la rupture des biocomposites résine polyester (UPR)/fibres d'Alfa traitées en fonction du taux de fibre, on constate une augmentation notable de la contrainte à la rupture pour les composites contenant la fibre d'Alfa traitée par rapport à ceux avec la fibre non traitée. Ceci est probablement dû à :

- La rupture de la liaison hydrogène dans la structure de réseau des fibres ;
- L'augmentation de la rugosité extérieure ;
- L'élimination d'une certaine quantité de lignine, de cire et des huiles couvrants la paroi cellulaire de la fibre d'Alfa ;

L'addition de l'hydroxyde de sodium (NaOH) à la fibre naturelle d'Alfa favorise l'ionisation du groupe d'hydroxyle selon la formule suivante :



Le traitement combiné des fibres d'Alfa affecte la qualité de l'adhésion entre la fibre traitée et la matrice en éliminant les impuretés cireuses et en comblant les vides. Par conséquent, le traitement de surface par acétylation a amélioré la topologie de surface de l'Alfa, renforçant ainsi l'adhésion interfaciale entre la matrice et la fibre.

Chapitre IV : Résultats et discussion

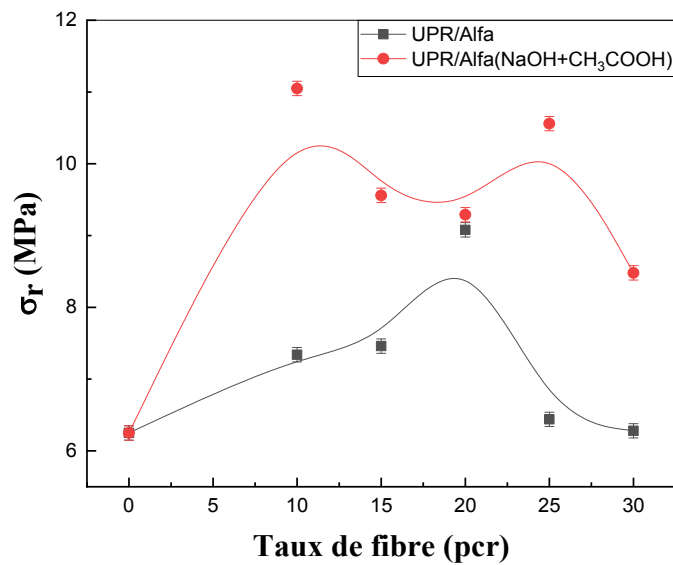


Figure IV. 6 : Variations de la contrainte à la rupture des biocomposites résine polyester (UPR)/ fibre d'Alfa en fonction du taux de fibre et du traitement de surface.

La figure IV.7 présente la variation de la déformation à la rupture des biocomposites résine polyester (UPR)/fibres d'Alfa traitées en fonction du taux de fibre.

D'après la figure IV.7, une augmentation significative de la déformation à la rupture est observée, passant d'une valeur de 4,85% pour les composites renforcés par 10pcr de fibres d'Alfa non traitées à 7,15% pour les composites renforcés par 10pcr de fibres d'Alfa traitées avec NaOH+CH₃COOH. Il semblerait que le traitement chimique de la surface des fibres d'Alfa favorise une meilleure adhésion interfaciale entre la fibre et la matrice.

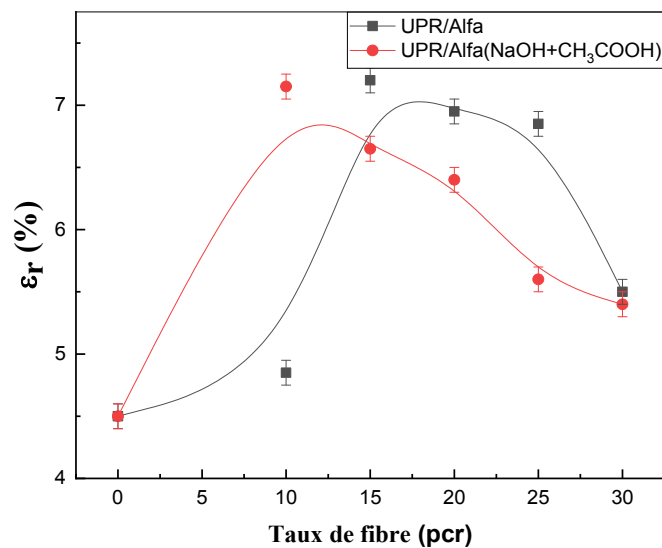


Figure IV. 7: Variations de la déformation à la rupture des biocomposites résine polyester (UPR)/ fibre d'Alfa en fonction du taux de fibre et du traitement de surface.

Chapitre IV : Résultats et discussion

IV.3.2. Résultats de l'essai de choc

La figure IV.8 représente les variations de la résistance au choc Izod des composites UPR/fibres d'Alfa en fonction du taux de fibres.

A. Effet du taux de fibres

La figure IV.8, illustrant les variations de la résistance au choc des composites UPR/fibres d'Alfa en fonction du taux de fibres, montre que la résilience varie avec l'ajout des fibres d'Alfa. Elle met en évidence une augmentation pour le taux de 20pcr de fibres, suivie d'une diminution lorsque la teneur en fibres augmente. Ces observations suggèrent que les composites présentent différentes dispersions en fonction des taux de fibres incorporés, et que lorsque celui-ci atteint 20pcr, la distribution du renfort au sein de la matrice devient optimale [51-52].

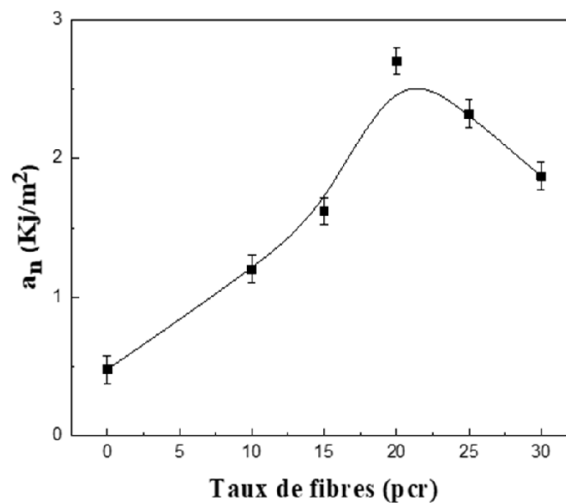


Figure IV. 8: Variations de la résilience des biocomposites résine polyester (UPR)/ fibre d'Alfa non traité en fonction du taux de fibre.

B. Effet du traitement chimique

➤ Traitement par $\text{NaOH}+\text{CH}_3\text{COOH}$

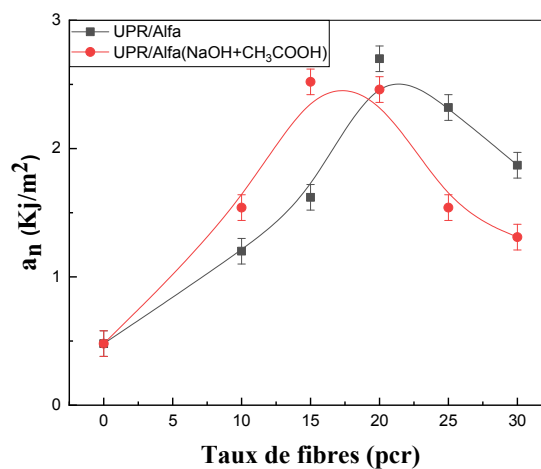


Figure IV. 9: Variations de la résilience des biocomposites résine polyester (UPR)/ fibre d'Alfa en fonction du taux de fibre et du traitement de surface.

Chapitre IV : Résultats et discussion

D'après la figure IV.9, on constate que le traitement chimique combiné de la fibre d'Alfa par NaOH+CH₃COOH a amélioré les liaisons chimiques et augmenté la résistance aux chocs. En comparant les valeurs de résistance aux chocs de la matrice pure avec celles des composites renforcés par des fibres d'Alfa, il ressort que pour tous les composites, la résistance aux chocs est supérieure lorsque les fibres d'Alfa ont été traitées par NaOH+CH₃COOH.

IV.3.3. Test de la dureté Shore D

L'évolution de la dureté des biocomposites résine polyester (UPR)/fibres d'Alfa en fonction du taux de fibres d'Alfa est présentée dans la figure IV.10. On constate une augmentation de la dureté des composites polyester (UPR)/fibres d'Alfa par rapport au composite vierge avec l'incorporation de fibres d'Alfa. Cette augmentation est d'autant plus significative lorsque le taux de fibres d'Alfa est élevé. Ces observations sont prévisibles étant donné que les fibres d'Alfa sont composées de 45 à 54 % de cellulose, une matière classée parmi les fibres dures, ce qui se traduit par une résistance accrue à la pénétration de l'aiguille du duromètre dans le matériau composite. Ainsi, elles contribuent à accroître la dureté des biocomposites résine polyester (UPR)/fibres d'Alfa.

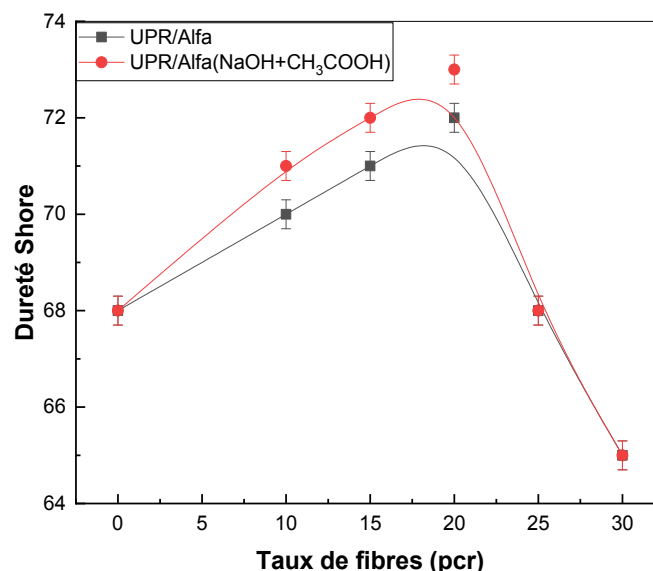


Figure IV. 10 : Variations de la dureté Shore des biocomposites résine polyester (UPR)/ fibres d'Alfa en fonction du taux de fibre et du traitement de surface.

IV.4. Caractérisation physique

IV.4.1. Test de densité

L'incorporation de la fibre d'Alfa dans la résine polyester conduit à l'obtention de composites à faible densité.

En effet, la figure IV.11, montre l'évolution de la densité en fonction du taux de la fibre d'Alfa, nous observons que l'augmentation du taux de la fibre d'Alfa (10pcr, 15pcr, 20pcr, 25pcr et 30pcr) affiche une tendance à la diminution de la densité des biocomposites résine polyester (UPR)/ fibre d'Alfa. En effet cette incorporation de la fibre d'Alfa dans la matrice polyester entraîne l'obtention d'un matériau plus léger. Ces résultats sont en accord avec les travaux de B. James et al [53].

Chapitre IV : Résultats et discussion

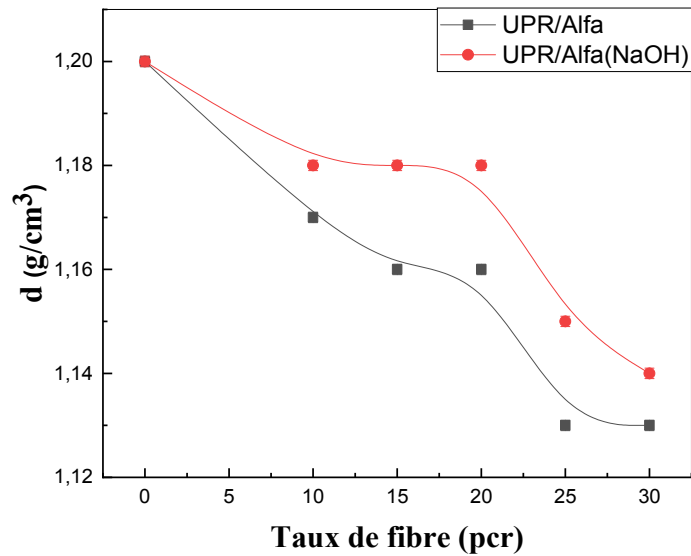


Figure IV. 11: Variations de la densité des biocomposites résine polyester (UPR)/ fibre d'Alfa en fonction du taux de fibre et du traitement de surface.

IV.4.2. Absorption d'eau

La fibre d'alfa, très riche en groupements hydroxyles, possède une structure idéale pour interagir avec les molécules d'eau par la formation de liaisons hydrogène [54].

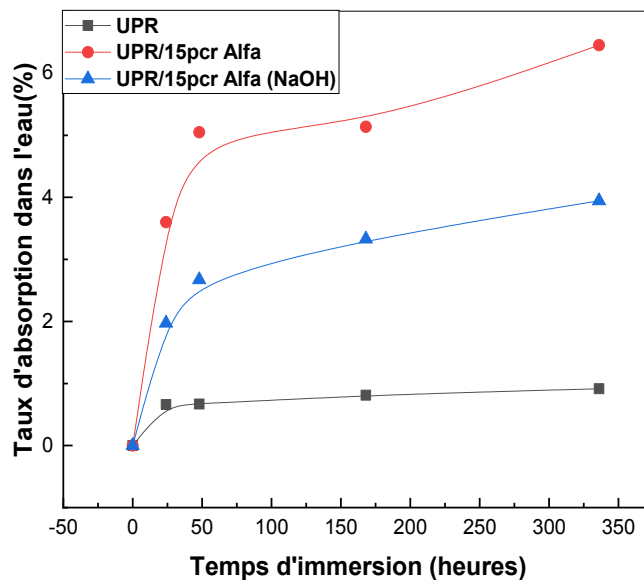


Figure IV. 12: Influence du taux de fibre et du traitement de surface sur l'absorption d'eau des bio-composites résine polyester UPR/ 15pcr Alfa.

À partir de la figure IV.12, on constate que le taux d'absorption d'eau des composites augmente linéairement par rapport à celui de la matrice polyester seule, qui enregistre un taux quasi négligeable (0,6%) pendant 4 jours. Cette faible absorption est due à la nature apolaire de ce polymère, qui lui confère un caractère hydrophobe, comme confirmé par S. Boufi et al [55] et Alain Dufresne et al [56].

Chapitre IV : Résultats et discussion

En revanche, pour les composites UPR/Alfa avec un taux de 15pcr de fibres, le taux d'absorption atteint 2,80% au bout de 10 jours. Ce comportement s'explique par le fait que la fibre d'alfa, très hydrophile en raison des nombreux groupements hydroxyles qu'elle contient, interagit avec les molécules d'eau environnantes en formant des liaisons hydrogène. Ainsi, plus le taux et la taille des fibres augmentent, plus la concentration en OH s'accroît, ce qui entraîne une augmentation significative du taux d'absorption d'eau.

De plus, l'absorption d'eau a diminué après le traitement de surface des fibres avec (NaOH+CH₃COOH) par rapport au matériau non traité. Cela est dû à une meilleure adhésion interfaciale entre la fibre et la matrice, ainsi qu'au fait que les fibres sont devenues plus hydrophobes. Les traitements chimiques des groupes hydroxyles des polymères de fibres ont réduit l'absorption d'eau dans les composites, ce qui est attribué à une meilleure interaction fibre-matrice. En effet, le traitement par (NaOH) des fibres d'Alfa a réduit les groupes polaires présents dans la fibre en remplaçant certains groupes hydroxyles à la surface des fibres.

IV.5. Conclusion

Une importante collecte de résultats a été réalisée suite à de nombreux essais sur une large variété d'éprouvettes. Ces essais comprennent des tests physiques, tels que l'essai de densité et l'absorption d'eau, ainsi que des tests mécaniques, tels que l'essai de traction, l'essai de choc et l'essai de dureté. De manière générale, les résultats obtenus sont à la fois impressionnants et concluants, et nous les jugeons acceptables.

Conclusion générale

Conclusion générale et perspectives

Conclusion générale et perspectives

Les composites ont acquis une importance indéniable en raison de leurs nombreux atouts. Leur adoption est en progression constante, surtout pour les composites à base de matrice thermoplastique, comme la résine polyester, qui présentent des avantages écologiques grâce à leur recyclabilité et des avantages économiques en raison de leur coût modéré. En outre, l'intégration de fibres végétales telles que les fibres d'alfa améliore considérablement leurs caractéristiques.

Dans notre étude, nous avons évalué les propriétés physico-mécaniques d'un composite fabriqué à partir de résine polyester et renforcé avec différentes proportions de fibres d'alfa, qu'elles soient traitées ou non (à des taux de 10, 15, 20, 25 et 30 pcr en poids de fibres par rapport à la résine).

À partir de l'analyse des résultats obtenus, plusieurs conclusions peuvent être tirées :

- Le traitement s'est avéré efficace, comme en témoigne l'analyse par spectroscopie infrarouge, qui a révélé des modifications dans les liaisons chimiques des fibres d'alfa après traitement.
- En ce qui concerne la résistance à la traction, les fibres traitées ont démontré une résistance supérieure à celles qui ne l'étaient pas. La proportion optimale de fibres pour obtenir une résistance maximale se situe entre 15 et 20 pcr par rapport à la résine.
- En ce qui concerne la résistance aux chocs, les fibres traitées ont surpassé les non traitées, offrant une résistance équivalente avec une quantité moindre de fibres. La proportion optimale de fibres dans le composite traité était de 15 à 20 pcr par rapport à la résine, tandis que pour les fibres non traitées, elle était de 25 à 30 pcr.
- En ce qui concerne la dureté, les fibres traitées ont également surpassé les fibres non traitées, ce qui peut être attribué à la réduction de la teneur en lignine, huiles et cires suite au traitement. La proportion optimale de fibres pour obtenir une dureté maximale était de 15 à 20 pcr par rapport à la résine.
- La densité des fibres d'alfa étant inférieure à celle de la résine, une augmentation de la proportion de fibres dans le composite entraîne une diminution de sa densité. De plus, la densité du composite à base de fibres non traitées est inférieure à celle du composite à base de fibres traitées.
- En ce qui concerne l'absorption d'eau, le taux d'absorption était plus faible pour les composites traités que pour les composites non traités à base de fibres d'alfa après 250 heures d'exposition dans l'eau.

Perspectives

Étant donné l'ampleur de ce projet, nous ne pouvons pas le limiter dans le temps ni par le nombre d'essais effectués. Une continuation de ce travail serait bénéfique en explorant la diversité des matrices thermoplastiques telles que le polyéthylène, le polypropylène, les polyamides, ainsi que les thermodurcissables comme l'époxy, le vinylester, la mélamine, et en variant également les fibres végétales telles que l'agave, le palmier dattier, etc. De plus, il serait intéressant d'explorer une gamme étendue d'essais mécaniques, tels que l'essai de fatigue, les essais de mécanique de la rupture (énergie de rupture, ténacité, etc.).

Conclusion générale et perspectives

Les résultats collectés contribueront à l'élaboration d'une base de données locale pour la confection de biocomposites selon les besoins spécifiques, ce qui facilitera la création de nouveaux matériaux biocomposites, leur certification, leur normalisation et leur brevetage. Nous espérons poursuivre ce travail dans un avenir proche.



Références bibliographiques

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] Ghebrid, N ; (2018), Etude des problèmes de conduction thermique dans un matériau composite à matrice polymère pigmenté de dioxyde de Titane, Thèse de doctorat, Université Ferhat Abbas-Setif 1, 165 p.
- [2] Toumi, O ; (2019), Optimisation de la configuration des tubes en matériaux composites sous pression, Mémoire de Master, Université Mohamed Khider de Biskra, 80 p.
- [3] Berthelot, J.M ; (2010), Mécanique des matériaux et structures composites, Institut Supérieur des Matériaux et Mécaniques Avancés, 5 p.
- [4] Baadi Zoubir, I ; Abed, A ; (2023), Analyse du comportement au choc des matériaux composites à fibres végétales, Mémoire de Master, Université Kasdi Merbah Ouargla, 56 p.
- [5] Rouam, K ; (2014), Elaboration, caractérisation mécanique et hygrothermique d'un stratifié renforcé par des fibres naturelles, Université M'hamed Bougara – Boumerdes, Mémoire de Magistère, 80 p.
- [6] Jérémie, A ; (2009), Etude comparative du comportement composite à matrice thermoplastique ou thermodurcissable, Thèse de doctorat, l'Institut National des Sciences Appliquées de Rouen, France, 220 p.
- [7] Gallot-lavallee, O ; (2006), Etude de la charge d'espace et des phénomènes luminescents comme précurseurs du vieillissement électrique d'une résine époxy utilisée dans l'isolation haute tension, Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse, 195 p.
- [8] Amaouche, T ; Ameer C ; (2020), Elaboration et caractérisation d'un composite à base de polyéthylène chargé d'une fibre végétale, Mémoire de Master, Université A. MIRA – Bejaia, 57 p.
- [9] Zabata-Massot, C ; (2004), Synthèse des matériaux composites par Co-broyage en voie sèche, caractérisation des propriétés physico-chimiques et d'usages des matériaux. Thèse de doctorat, l'institut national polytechnique de Toulouse, 370 p.
- [10] Jean-Marie, B ; (2002), L'industrie française des matériaux composites.
- [11] Medjani, S ; (2016), Elaboration et caractérisation des matériaux compositions sandwichs multicouches, Mémoire de Master, Université M'hamed Bougara, Boumerdes, 93 p.
- [12] Hadadi, M, Etude numérique avec comparaison expérimentale des propriétés.
- [13] Benyahia, A ; Merrouche, A ; Rokbi, M ; Kouadri, Z ; (2013), Study the effect of alkali treatment of natural fibers on the mechanical behavior of the composite unsaturated, Semantic Scholar, Mechanics and Industry, pp.69-73.
- [14] Berthelot, J.M ; (2012), Matériaux composites : Comportement mécanique et analyse des structures, Lavoisier, 638 p.
- [15] Charef, N ; Chaib, A ; (2021), Le renforcement des structures de génie civil par matériaux composites, Mémoire de Master, Université Abdelhamid Ibn Badis – Mostaganem, 77 p.

Références bibliographiques

- [16] Les textiles de l'Égypte ancienne : artefacts archéologiques et échantillons archéométriques google picture.
- [17] Faruk,O; Bledzki, A; Fink, H; Sain, M; (2010), Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000–2010, Progress in Polymer Science, pp.1552-1596.
- [18] Mishra,S; Misra,M; Tripathy,S.S; Nayak,S.K; Mohanty,A.K; (2001), Graft copolymerization of acrylonitrile on chemically modified sisal fibers”, macromolecular materials and engineering,pp.107-113.
- [19] Amaouche, T ; Ameer C ; (2020), Elaboration et caractérisation d'un composite à base de polyéthylène chargé d'une fibre végétale, Mémoire de Master, Université A. MIRA – Bejaia, 57 p.
- [20] Mishra,S; Misra,M; Tripathy, S.S; Nayak, S.K; Mohanty,A.K; (2001), Graft copolymerization of acrylonitrile on chemically modified sisal fibers, macromolecular materials and engineering, pp. 107-113.
- [21] Yawo, Nenonene Amen ; (2009), Elaboration et caractérisation mécanique de panneaux de particules de tige de kénaf et de bioadhésifs à base de colle d'os, de tannin ou de mucilage.
- [22] Baley, C, Le Duigou, A ; Bourmaud, A ; Davies, P; (2012), Influence of drying on the mechanical behaviour of flax fibres and their unidirectional composites, Applied Science and Manufacturing, pp. 1226-1233.
- [23] Bismarck, A; Mishra, S; Lampke, T; (2005), Plant fibers as reinforcement for green composites, Natural fibers, biopolymers, and biocomposites, 77 p.
- [24] C.A.R.M.A ; (2006), Glossaire des matériaux composites renforcés de fibres d'origine renouvelable, Centre d'Animation Régionale en Matériaux Avancés, 24 p.
- [25] Samui,A.B ; Sundararajan, S; Kumar, V; Kulkarni, P.S; (2015), Cellulose modification for imparting smartness: thermoregulation, self-cleaning, solar cell and electroactuation. Cellulose and Cellulose Composites: Modification, Characterization and Applications.
- [26] Colonna, P ; (2006), La chimie verte, 530 p.
- [27] Wahiba, A ; Narimane, A ; Zaidi, L ; (2020), Etude des Biocomposites à base de biopolymères/fibre végétales : Fibre de diss, Master en Génie des Procédés, Scientifique Université A. Mira, Bejaia, 87 p.
- [28] Khan, M; Fengel, J.M; Fengel, G; (2007), The Properties of Vegetable Fibers.
- [29] Richard, N ; Modélisation multi-échelle et caractérisation de l'anisotropie élastique de fibres végétales pour le renforcement de matériaux composites, Thèse de doctorat, Université Blaise Pascal(Ubp) - Clermont II,185 p.
- [30] Rouam, K ; (2015) ; Elaboration, caractérisation mécanique et hygrothermique d'un stratifié renforcé par des fibres naturelles, 69 p.
- [31] textiles Les fibres végétales pour les applications textiles, <https://www.agrocomposites.fr/les-fibres-vegetales-pour-les-applications->

Références bibliographiques

[textiles/#:~:text=Le%20lin%2C%20le%20chanvre%2C%20le,et%20non%20conventionnelles%20est%20pr%C3%A9sent%C3%A9.](#)

[32] Gallot-lavallee, O ; (2006) ; Etude de la charge d'espace et des phénomènes luminescents comme précurseurs du vieillissement électrique d'une résine époxy utilisée dans l'isolation haute tension , Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse, 195 p.

[33] Dujardin, N ; (2014), Un Matériau Biosource De Choix : Les Fibres Naturelles. Caractérisations Et Applications, Université Paris-Est-Créteil, 61 avenue du Général de Gaulle, 94010 Créteil Cedex, 12 p.

[34] Jérémie,A ; (2009), Etude comparative du comportement composite à matrice thermoplastique ou thermodurcissable », Thèse de doctorat, l'Institut National des Sciences Appliquées de Rouen, France, 220 p.

[35] Mwaikambo, E.W ; (2011) ; Alfa Fibres: Chemistry, Structure, Properties, and Applications.

[36] El-Abbassi,F; Ayad,R; Lamdouara, N ; Kebir, H; Sabhi, H ; Buet, S ; Assarar, M; (2014), Elaboration, analyse et modélisation mécanique numérique d'agrocomposites à base de fibres courtes d'alfa, MATEC Web of Conferences, 6 p.

[37] Dallel, M ; (2012), Evaluation du potentiel textile des fibres d'Alfa (Stipa Tenacissima L.) : caractérisation physico-chimique de la fibre, Thèse de doctorat, Université de Haute Alsace, 154 p.

[38] Bakhouch, H.E ; (2020), Elaboration et Caractérisation Numérique de Biocomposite à Matrice Epoxyde et Renfort Fibres de Sisal, Mémoire de Master, Université Larbi Tébessi-Tébessa, 98 p.

[39] Belaadi, A ; (2011), Elaboration et caractérisation des matériaux composites à renfort en fibres naturelles (fibre de sisal), Mémoire de Magistère, Université de Guelma, 68 p.

[40] Djebbloun, Y ; (2018), Contribution à la caractérisation des matériaux composites renforcés de fibres végétales, Thèse de Doctorat en Génie mécanique de l'université de Biskra, 87 p.

[41] Menadi,S; Benazzouk,A; Douzane,O; Merzoud,M; Habita, M.F; Langlet,T; (2013), Etude de la faisabilité d'un composite à matrice cimentaire renforcée de fibres de jute, Rev.Sci.Technol., Synthèse 27, pp. 40-49.

[42]. ASTM D 5083-10e1; (2010), Standard Test Method for Tensile Properties of Reinforced Thermosetting Plastics Using Straight-Sided Specimens, ASTM International, West Conshohocken, PA.

[43]. ASTM D3039 / D3039M-14; (2014), Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials, ASTM International, West Conshohocken, PA.

[44] Boulechfar Chérifa, Elaboration Des Nanocomposites à Renfort Lamellaire

[45] ASTM D2240-15; (2021), Standard Test Method for Rubber Property—Durometer Hardness.

[46] ISO1183, Méthodes de détermination de la masse volumique des plastiques non alvéolaires, Partie 1: Méthode par immersion, méthode du pycnomètre en milieu liquide et méthode par titrage.

Références bibliographiques

- [47] Beldzki, A.K; Letman,A; Viksne, A. Rence, L; (2005), A comparison of compounding processes and wood type for wood fibre-PP composites, *Composites Part A Applied Science and Manufacturing*, pp.789-797.
- [48] Georgopoulos,S; Tarantili,P.A; Avgerinos,E; Andreopoulos,A.G; Koukios,E.G; (2005), Thermoplastic polymers reinforced with fibrous agricultural residues, *Polymer Degradation and Stability*, pp.303-312.
- [49] Guessoum,M; Nekkaa,S; Fenouillot-Rimlinger,F; Haddaoui,N; (2012), Effects of kaolin surface treatments on the thermomechanical properties and on the degradation of polypropylene, *International Journal of Polymer Science*, 10 p.
- [50] Chirayil,C; Mathewa,L; Hassanb,P; Mozeticc,M; Thomas,S; (2014), Rheological behaviour of nanocellulose reinforced unsaturated polyester nanocomposites .*International Journal of Biological Macromolecules*, *International Journal of Biological Macromolecules*, pp.274-281.
- [51] Crespo,J.E; Balart,R; Sanchez,L; Lopez,J; (2007), Mechanical behaviour of vinyl plastisols with cellulosique fillers,Analysis of the interface between particules and matrices, *Int J Adhesion & Adhesives*, pp.422-428.
- [52] Hristov,V.N; Krumova,M; Vasileva,S; Michler,G.H; (2004), Modified polypropylene wood flour composites, II.Fracture, deformation, and mechanical properties, *J.App,Polym*, pp.1286-1292.
- [53] James,B; Lee,B.J; McDonald, A.G; (2001), Influence of fiber length on the mechanical properties of wood-fiber/polypropylène preperg sheets, *Materials research innovations*, pp.97-103.
- [54] Nakatani,H; Suzuki,S; Tanaka,T; Terano,M; (2005), New kinetic aspect on the mechanism of thermal oxidative degradation of PP with various tacticities, *Polymer*, pp.12366-12371.
- [55] Boufi,S; Abdelmouleh,M; Belgacem,M.N; Dufresne,A; (2007), Short natural-fibre reinforced polyethylene and natural rubber composites: Effect of silane coupling agents and fibres loading, *Composite Science and Technology*, Vol 67,pp.1627-1639.
- [56] Dufersne,A; Pasquini,D; Eliangela de Morais,T ; Aprigio da Silva Curvelo,A ; Naceur,M ; (2008), *Materiaux composites a base de déchets Végétaux : Élaboration, caractérisation et propriétés thermiques*,*Composite Science and Technology*, Vol 68,pp.193-201.