

People's Democratic Republic of Algeria

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

Ministry of Higher Education and Scientific Research

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Mohamed Boudiaf University of M'sila

جامعة المسيلة

Faculty of Technology

كلية التكنولوجيا



Département de Génie Mécanique

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du diplôme de :

MASTER

En Génie Mécanique

Option : Génie des matériaux

Présenté par :

BOUAZIZ Nourelimane & ACHOUR Saber

Thème

**ELABORATION ET CARACTERISATION DES COMPOSITES A
BASE DE FIBRES DE VEGETALES ISSUES DE LA REGION DE
BOUSSAADA**

Devant le jury composé de :

NOM et Prénom	Grade	Qualité
AISSI ADEL	MCA	Président
MEDDAH Mustapha	MAA	Encadreur
ROKBI Mansour	Professeur	Co-Encadreur
ROUABHI YUCEF	MCB	Examineur

Année Universitaire : 2023 / 2024

N° d'ordre : GM/...../2024

DEDICACE

Avec tous mes sentiments de respect, avec l'expérience de ma reconnaissance, je dédie ma remise de diplôme et ma joie

À mon paradis, à la prunelle de mes yeux, à la source de ma joie et mon bonheur, ma lune et le fil d'espoir qui allumer mon chemin, ma moitié. Tous les mots sont insuffisants pour décrire. Vous avez été pour moi ma mère, mon père, mon frère et ma sœur, Une source de tendresse et de sagesse, mon refuge dans les moments difficiles et mon courage face aux défis. Vous ne m'avez jamais privé de soins, d'attention et de soutien illimités, C'est grâce à vous et à vos sacrifices que j'en suis arrivé là où j'en suis aujourd'hui.

Je vous aime plus que tout au monde et je prie Dieu de vous accorder la santé et le bien-être, et de vous garder comme un trésor et une parure dans la vie (MELIZI NABILA).

Maman

À celui qui m'a fait une femme, ma source de vie, d'amour et d'affection. a mon support qui était toujours à mes côtés pour me soutenir m'encourager, à mon prince

Papa

À ma grand-mère, bien-aimée, Source de tendresse et d'amour.

Vous avez été pour moi ma mère, ma sœur et mon amie. Je vous remercie du fond du cœur pour tout ce que vous m'avez apporté en termes de soins. C'est grâce à vous et à vos bénédictions que j'en suis arrivé là où j'en suis aujourd'hui. Je vous aime beaucoup et je prie Dieu de vous accorder la santé et le bien-être, et de vous garder comme un trésor et une parure dans la vie.

À mon cher oncle, mon deuxième père, Vous avez été mon pilier, mon guide, la lumière qui a éclairé mon chemin et la boussole qui m'a orienté tout au long de mon parcours de vie.

Je vous remercie du fond du cœur pour tout ce que vous avez fait pour moi, et je prie Dieu de vous récompenser abondamment et de vous accorder santé et bien-être. AYACHE MELIZI.

À mes chers Amis En souvenir de nos éclats de rire et des bons moments, en souvenir de tout ce qu'on a vécu ensemble, j'espère de tout mon cœur que notre amitié durera éternellement.

À tous les membres de ma famille et toute personne qui porte le nom BOUAZIZ et MELIZI.

À mon soutien, Je te remercie du fond du cœur pour ton soutien indéfectible AKRAM.

À mon binôme merci boucaux.

NOUR EL IMANE

DEDICACE

Tout d'abord, je tiens à remercier **DIEU**

De m'avoir donné la force et le courage de mener à bien ce travail.

Je tiens à dédier ce travail à:

A ma tendre mère et mon père et les mon frère

A ma femme, A mon fils iyad

A mon binôme

A président de la commune bin djoudi ammar sur sa compréhension

REMERCIEMENTS

Le remerciement infini avant tous est à Dieu le plus puissant qui m'a donné le courage, la volonté et la force pour réaliser ce mémoire.

J'aimerais remercier les personnes qui m'ont aidé et guidé.

D'abord je voudrais remercier mon encadreur, le Professeur **ROKBI Mansour**, chef du département de Génie Mécanique à l'université Mohamed Boudiaf Msila que pour sa confiance, son support et pour m'avoir donné ses avis et ses instructions tout au long de cette étude.

Je voudrais également dire un grand merci à mon encadreur **MEDDAH Mustapha** qui m'a guidé pendant toute la durée de ce travail, ainsi que pour sa patience et ses précieux conseils tout au long de l'année académique. Les mots me manquent pour le remercier

Je voudrais également dire un grand merci à Monsieur **KHALDONE ABD ELRAOUFE** pour m'avoir accueilli dans son laboratoire de recherche, son soutien permanent et ses conseils tout au long de mes travaux. Grâce à lui ce travail est devenu possible. Je remercie également Monsieur **AISSI ADEL**, Professeur au département de génie mécanique de l'université Mohamed Boudiaf Msila, pour l'honneur qu'il m'a fait en acceptant de présider le jury de soutenance de ce mémoire.

Je tiens à adresser mes vifs remerciements à :

-Monsieur **ROUABHI YUCEF** docteur au département de génie mécanique à l'université Mohamed Boudiaf Msila

Pour avoir accepté de juger ce travail. Enfin, J'exprimer mes remerciements les plus sincères et les plus chaleureux à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

NOUR EL IMANE

SOMMAIRE

Résumé	i
Liste des figures	ii
Listes des tableaux.....	vi
Introduction générale.....	1
Références	
Chapitre I. Généralité sur les matériaux composites	4
I.1. Introduction	4
I.2. Définition des matériaux composites	4
I.3. Classification des matériaux composites	5
I.3.1. Composite hautes performances (HP).....	5
I.3.2. Composite grandes diffusions (GD).....	5
I.4. Avantage des matériaux composites	6
I.5. Domaines d'utilisation	6
I.6. Constituants de base des matériaux composites.....	8
I.6.1. Matrice	9
I.6.2. Renfort	12
I.7. Structure des matériaux composites.....	18
I.7.1. Monocouche.....	18
I.7.2. Stratifiés	19
I.7.3. Sandwichs	20
I.8. Mise en œuvre des matériaux composites	21
I.8.1. Moulage par transfert de résine (RTM)	21
I.8.2. Moulage au contact	22
I.8.3. Moulage par projection simultanée.....	23
I.8.4. Moulage par injection	23
I.8.5. Moulage par compression.....	24
I.8.6. Enroulement du filament.....	25
I.8.7. Moulage par pultrusion	25
I.8.8. Moulage sous vide.....	26
❖ Principe	26
❖ Cas d'utilisation.....	26
❖ Optimisation des conditions de travail et de sécurité (réduction des émissions de styrène) [22]	26
❖ Avantage	26

Références

Chapitre II. Fibres naturelles.....	28
II.1 Introduction	28
II.1. Fibres naturelles	28
Fibres minérales.....	28
II.1.1. Fibres animales.....	29
II.1.2. Fibres végétales :.....	29
II.1.3. Introduction aux fibres végétales:.....	30
II.2. Morphologies des fibres végétales.....	34
II.2.1. Structure d'une fibre végétale	34
II.2.2. Composition chimique des fibres végétales	35
II.3. Propriétés mécaniques, physiques et chimiques des fibres végétales	40
II.4. Méthodes d'extraction des fibres végétales	42
II.4.1. Extraction mécanique.....	43
II.4.2. Extraction chimique.....	45
II.4.3. Extraction biologique	46
II.5. Application des fibres végétales	47
II.6. Analyse de l'accessibilité des fibres végétales	48
II.6.1. Disponibilité mondiale des fibres végétales.....	48
II.6.2. Fibres végétales sont disponibles en Algérie	49
II.7. Importance de l'emploi des fibres naturelles	51
II.8. Statistiques sur les fibres naturelles :	53
Références	28
Chapitre III. Extraction des fibres et Élaboration des composites.....	54
III.1. Introduction	54
III.2. Présentation de la région du Boussaâda.....	54
III.3. Présentation des fibres étudiées	55
III.3.1. Alfa (<i>Stipa tenacissima</i>)	55
III.3.2. Agave americana	55
III.4. Préparation des fibres.....	56
III.4.1. Agave americana	56
III.4.2. Alfa.....	57
III.5. Extraction des fibres par rouissage	57
III.6. Matrice (Polyester résine).....	59
III.7. Élaboration des composites	59

III.7.1.	Préparation de plis unidirectionnels	59
III.7.2.	Procédé de mise en forme (Moulage sous vide).....	60
III.7.3.	Préparation des échantillons	62
III.8.	Évaluation du taux de fibres	62
III.9.	Conclusion.....	63

Références

CHAPITRE IV	70
-------------------	----

Caractérisation Physico-Chimique et Mécanique En Traction des Fibres Végétales	70
--	----

.....Erreur ! Signet non défini.

Chapitre IV. Caractérisation Physico-Chimique et Mécanique En Traction des Fibres

Végétales.....	64
----------------	----

IV.1.	Spectrométrie infrarouge à transformée de Fourier (ATR FTIR).....	64
-------	---	----

IV.2.	Diffraction des rayons X	67
-------	--------------------------------	----

IV.3.	Propriétés mécaniques des fibres.....	67
-------	---------------------------------------	----

IV.4.	Étude statistique du comportement en statique des fibres Alfa et Agave Americana	71
-------	--	----

IV.4.1.	Analyse statistique	71
---------	---------------------------	----

IV.4.2.	Analyse Statistique de Weibull	72
---------	--------------------------------------	----

IV.4.3.	Résultats et discussions :	71
---------	----------------------------------	----

IV.5.	Conclusion.....	74
-------	-----------------	----

Références

Chapitre V. Caractérisation Des Composites Unidirectionnels.....	76
--	----

V.1.	Caractérisation des composites unidirectionnels	76
------	---	----

V.1.1.	Essais de traction	76
--------	--------------------------	----

V.1.2.	Essais de flexion trois points	77
--------	--------------------------------------	----

V.2.	Résultats et discussions	78
------	--------------------------------	----

V.2.1.	Essai en traction	78
--------	-------------------------	----

V.2.2.	Essai en flexion 3 point	82
--------	--------------------------------	----

Références

Conclusion générale & perspectives	86
--	----

ملخص

الاستخدام المتزايد للألياف النباتية كتعزيز في مصفوفات حرارية وبلاستيكية يوفر فوائد بيئية مثيرة للاهتمام للغاية. من السمات المميزة لهذه الألياف هو تكلفتها المنخفضة، وخفة وزنها، وارتفاع وحدة نمطية. وبالتالي، أصبحت المواد المركبة ذات التعزيز النباتي محورًا مهمًا نظرًا لاستخدامها في مجموعة متنوعة من القطاعات الصناعية. يتناول هذا البحث دراسة تحضير وتوصيف الفيزيائي والكيميائي والميكانيكي (سلوك الشد والانحناء) لنوعين من المركبات ذات الاتجاه الواحد مع مصفوفة من الراتنج الحراري المقوى إما بألياف الحلفاء (*Stipa tenacissima*) أو بألياف نبات الصبار الأمريكي (*Agave americana*). تتوفر هاتان الألياف النباتيتين في منطقة بوسعادة (الجزائر). قمنا بتحضير عينات من البوليمر وتعرضنا لنفس طرق التوصيف المستخدمة للمواد المركبة. تمت مقارنة النتائج المحصلة مع تلك المحصلة على المركبات. يتم تأكيد الفائدة الإيجابية لنوعي الألياف كتعزيز للمادة المركبة بمصفوفة من البوليمر وفقًا للنتائج المحصلة على سلوك الشد والانحناء للمركبين وللراتنج البوليمر النقي. أثبتت ألياف "الصبار الأمريكي" فعاليتها كتعزيز للمواد المركبة. توفر المركب "بوليمر/الصبار الأمريكي" أفضل خصائص الصلابة مقارنةً بـ "بوليمر/حلفاء (*Stipa tenacissima*)".

الكلمات الرئيسية: مواد مركبة، ألياف نباتية، بوليمر، حلفاء، الصبار الأمريكي

Abstract

The increasing use of plant fibres as reinforcements in thermosetting and thermoplastic matrices is providing some very interesting environmental benefits. The outstanding features of these fibres are their low cost, low weight and high specific modulus. As a result, plant-reinforced composite materials have become an important issue in view of their use in various industrial sectors.

This thesis focuses on the development and physic-chemical and mechanical characterisation (tensile and flexural behaviour) of two types of unidirectional composites with a polyester thermosetting resin matrix reinforced with either Alfa (*Stipa tenacissima*) or Agave Americana fibres.

Both of these plant fibres are available in the Boussaâda region (Algeria). We developed polyester specimens. These were subjected to the same characterisation methods used for composite materials. The results obtained were compared with those obtained for composites. The beneficial effect of the two types of fibre as reinforcements for a polyester matrix composite material is clearly established in view of the results obtained on the tensile and flexural behaviour of the two composites and the pure polyester resin. Agave Americana' fibres have proved their effectiveness as reinforcements for composite materials. The "polyester/Agave Americana" composite offers the best stiffness properties compared to "polyester/Alfa".

Key words: Composite, natural fibers, polyester, Alfa (*Stipa tenacissima*), Agave Americana.

Résumé

L'utilisation croissante de fibres végétales comme renforts dans des matrices thermodurcissables et thermoplastiques fournit des avantages environnementaux très intéressants. Les caractéristiques marquantes de ces fibres sont leur faible coût, léger poids, haut module spécifique. Ainsi, les matériaux composites à renfort végétale sont devenus un enjeu important au vu de leur utilisation dans divers secteurs industriels.

Ce travail de mémoire porte sur l'élaboration et la caractérisation physico-chimique et mécanique (comportement en traction et en flexion) de deux types de composites unidirectionnels à matrice de résine thermodurcissable polyester renforcée soit par des fibres de Alfa (*Stipa tenacissima*) ou par des fibres d'Agave americana.

Ces deux fibres végétales sont disponibles dans la région du Boussaâda (Algérie). Nous avons élaboré des éprouvettes en polyester. Ces dernières ont été soumises aux mêmes méthodes de caractérisation utilisées pour les matériaux composites. Les résultats obtenus sont comparés à ceux obtenus sur les composites. L'effet bénéfique des deux types de fibres comme renforts d'un matériau composite à matrice polyester est clairement établi au vu des résultats obtenus sur le comportement en traction et en flexion des deux composites et de la résine pure en polyester. Les fibres de "Agave Americana" ont prouvé leurs efficacités comme renfort des matériaux composites. Le composite " polyester/Agave Americana " offre les meilleures propriétés de rigidité par rapport de " polyester/Alfa.

Mots clés : Composite, Fibres naturelles, polyester, Alfa (*Stipa tenacissima*), Agave Americana.

Liste des figures

Fig.I. 1 Pièces bio-composite à différentes fibres végétales : (a) Mercedes classe S [2] (b) Voiture PSA [3].....	7
Fig.I. 2 Domaines d’application des matériaux composites : (a) Militaire ; (b) Industrie navale ;(c)Aérospatiale ;(d) Énergie ;(e) Sport ;(f) Aéronautique.....	7
Fig.I. 3 Déférentes familles de matrices	8
Fig.I. 4 Déférentes familles de matrices	9
Fig.I. 5 Structures géométriques des renforts composites à fibres longues, à fibres courtes et à particules.	13
Fig.I. 6 Les principales fibres: (a) fibres de verre, (b) fibres de carbone, (c) fibres d’aramide. ...	13
Fig.I. 7 Fibres de verre	14
Fig.I. 8 Processus d’élaboration des fibres de verre	15
Fig.I. 9 Fibres acryliques en poly acrylonitrile (PAN).....	16
Fig.I. 10 Fibres d’aramide (Kevlar)	16
Fig.I.11 Différentes architectures des renforts de composites : (a)mats de verre, (b) tissu unidirectionnel (UD), (c) tissu bidirectionnel	18
Fig.I. 12 Tissus bidirectionnels: a) Le taffetas, b) Le sergé, c) Le satin.....	18
Fig.I. 13 Monocouche UD (pli unidirectionnel)	19
Fig.I. 14 Laminé composé de plusieurs monocouches ayant des orientations différentes.....	19
Fig.I 15. Composite stratifiée	20
Fig.I. 16 Composite sandwich	21
Fig.I. 17 Composite sandwich	21
Fig.18 Schéma de principe de la technique de Moulage par transfert de résine [65]	22
Fig.I. 19 Moulage au contactFigure.....	22
Fig.I.20. Moulage par projection	23
Fig.I. 21 Moulage par injection.....	24
Fig.I. 22 Moulage par compression	24
Fig.I. 23 Moulage par enroulement filamentaire	25

Fig.I. 24 Moulage par pultrusion	26
Fig.I. 25 Moulage sous vide.....	27
Fig.II. 1 Natural fibers of animal origins.....	29
Fig.II. 2 Classification des fibres végétales [4].	31
Fig.II. 3 Sisal	32
Fig.II. 4 Palmier.....	32
Fig.II. 5 Jute.....	33
Fig.II. 6 Coton	33
Fig.II. 7 Fibre Alfa.....	34
Fig.II. 8 Représentation schématique de la paroi cellulaire[13]	35
Fig.II. 9 Composition chimique d'une fibre végétale.....	36
Fig.II. 10 Structure chimique de la cellulose	37
Fig.II. 11 Différentes Structure chimique des hémicelluloses.....	37
Fig.II. 12 Structure de la lignine	38
Fig.II. 13 Structure moléculaire de la pectine	39
Fig.II. 14 Représentation de la distribution des fibres :(a) distribution aléatoire (b) distribution parallèle	43
Fig.II. 15 Différente machines : (a) machine de laminage ; (b) machine de décortication.....	44
Fig.II. 16 Rouissage à terre.....	46
Fig.II. 17 Rouissage à l'eau	47
Fig.II. 18 Gisement mondial de fibres végétales hors coton et bois (2001-2008)[21]	49
Fig.II. 19 Gisement de fibres végétales en Algérie [22].....	50
Fig.II. 20 Fibres chimiques - production mondiale 2000-2014 Publié par Statista Research Ministère, 28 juillet 2015 [24].....	53
Fig.III. 1 Plante d'Alfa présente dans la région du Boussaâda (Msila, Algérie)	55
Fig.III. 2 Plante "Agave Americana" présente dans la région du Boussaâda (Msila, Algérie)...	56
Fig.III. 3 Agave americana (a) plante croissante, (b) les lames de la plante.....	56
Fig.III. 4 Feuilles d'Alfa sélectionnées.	57

Fig.III. 5 Différentes étapes de la méthode d'extraction de la fibre d'agave :a) Feuilles plongées dans l'eau ;b) biodégradation des fibres ; c) Fibres lavées à l'eau ; d) fibres séchée à l'air ; e) étuvage des fibres ; f) fibres obtenues.....	58
Fig.III. 6 Différentes étapes de la méthode d'extraction de la fibre d'alfa :(a) les feuilles plongées dans l'eau ;(b) et (c) broyage les tiges ; (d) fibres séchée à l'air ; (e) étuvage des fibres ; (f) fibres finales obtenues.....	58
Fig.III. 7 plis unidirectionnels de :(a) Alfa ;(b) Agave americana.....	59
Fig.III. 8 préparation de la résine.	60
Fig.III. 9 Dispositif du moulage sous vide.	61
Fig.III. 10 Plaques bio-composites.....	61
Fig.III. 11 Tronçonneuse à disque en diamant utilisée pour la découpe des bio-composites	62
Fig.III. 12 Types des éprouvettes obtenus: (a) Traction et Flexion 3-points résine polyester, (b) Traction bio-composites, (c) Flexion 3-points bio-composites.....	62
Fig.IV. 1 Essais de traction : (a) : Montage de l'éprouvette (b) : dimensions de l'éprouvette de traction	64
Fig.IV. 2 Dispositif pour la flexion trois points : (a): Montage de flexion 3 points ; (b) : Schéma de l'éprouvette de flexion.....	64
Fig.IV. 3 Courbes types (σ , ϵ) en traction de la résine seule et de composite a fibre.....	65
Fig.IV. 4 Courbes types (σ , ϵ) en traction de la résine seule et de composite à fibre d'agave	68
Fig.IV. 5 Courbes types (σ , ϵ) en flexion 3-points de la résine seule et de composite a fibre d'Alfa	70
Fig.IV. 6 Courbes types (σ , ϵ) en flexion 3-points de la résine seule et de composite a fibre d'Agave	71
Fig.IV. 7 : Distribution de Weibull à 2 paramètres pour les contraintes à la rupture des fibres : (a) d'Alfa, (b) Agave Americana.....	72
Fig.IV. 8.: Distribution de Weibull à 2 paramètres pour les modules de Young des fibres : (a) d'Alfa, (b) Agave Americana.....	73
Fig.IV. 9 : Distribution de Weibull à 2 paramètres pour les déformations à la rupture des fibres : (a) d'Alfa, (b) Agave Americana	73

Fig.V.1 Essais de traction : (a) : Montage de l'éprouvette (b) : dimensions de l'éprouvette de traction.....	77
Fig.V.2 Dispositif pour la flexion trois points : (a): Montage de flexion 3 points ; (b) : Schéma de l'éprouvette de flexion.....	77
Fig.V.3 : Courbes types ($\bar{\sigma}$, ϵ) en traction de résine.....	79
Fig.V.1 Courbes types ($\bar{\sigma}$, ϵ) en traction de la résine seule et de composite à fibre d'Alfa.....	80
Fig.V.4 Courbes types ($\bar{\sigma}$, ϵ) en traction de la résine seule et de composite à fibre d'agave.....	80
Fig.V.5 Courbes types ($\bar{\sigma}$, ϵ) en flexion 3-points de la résine seule et de composite à fibre d'Alfa.....	83
Fig.V.5 Courbes types ($\bar{\sigma}$, ϵ) en flexion 3-points de la résine seule et de composite à fibre d'Alfa.....	83

Listes des tableaux

Tableau I. 1 Caractéristique mécaniques de résines TD thermodurcissables usuelles [21].....	10
Tableau II. 1 Composition chimique de quelques fibres végétales [22]-[20].....	40
Tableau II. 2 Propriétés mécaniques des fibres naturelles les plus courantes [18].....	41
Tableau II. 3 Propriétés physiques des fibres naturelles [20].....	42
Tableau II. 4 Domaines d'application des fibres végétales [12].....	48
Tableau II. 5 Avantages et inconvénients des fibres végétales comme renfort de matériaux composites[23]	52
Tableau IV. 1 Identification des pics les plus importants du spectre ATR-FTIR selon les études issues de la littérature [3,6-13].....	66
Tableau. IV.2 Propriétés mécanique des fibres Alfa et Agave Americana.....	69
Tableau IV.3: Résultats des probabilités de Weibull pour les propriétés mécaniques des fibres Alfa et Agave Americana.....	74
Tableau V. 1 : Comparaison des propriétés mécaniques en traction des composites avec celles des composites renforcés par des fibres.....	82
Tableau.V. 2 Comparaison des propriétés mécaniques en flexion des composites "Polyester /Alfa", " Polyester /Agave Americana" avec celles des composites renforcés par des fibres unidirectionnelles citées dans la littérature.	85

Introduction Générale

Introduction générale

La recherche développement sur l'utilisation de composites renforcés par des fibres naturelles a débutée en 1900. Depuis plusieurs décennies, Elle a fait l'objet d'un grand intérêt.

En 1930, Henry Ford a développé une matrice à base de soja renforcée par des fibres naturelles pour former des composites utilisées comme panneau de carrosserie [1]. Au cours de la dernière décennie, les chercheurs ont montré beaucoup d'intérêt pour les fibres végétales. Cet intérêt est dû à la variété et à la multiplicité de leurs caractéristiques telles que la biodégradabilité, faible densité, non-toxicité, faible coût et la recyclabilité [2, 3]. Ces caractéristiques justifient le remplacement des fibres synthétiques (verre, kevlar, carbone....) par les fibres végétales.

Cependant, les fibres végétales présentent des inconvénients tels que leur structure anisotrope, un taux élevé d'absorption de l'humidité et leur nature hydrophobe empêchant la bonne adhésion avec les matrices polymères. De ce fait, Le défi majeur dans l'utilisation de ces fibres comme agent de renforcement dans les matériaux composites est d'améliorer la liaison entre les fibres et les matrices polymères.

Les composites renforcés par des fibres naturelles plus respectueux de l'environnement, suscitent un intérêt croissant de la part de nombreux secteurs industriels : le transport (aéronautique, automobile, ...), l'industrie du bâtiment et de la construction (panneaux de cloison, plafond lambris...), les applications militaires, les produits de consommation et de l'emballage [4]. On les utilise également dans l'isolation thermo-acoustique des bâtiments et dans la fabrication du papier. Cet engouement s'explique principalement par les propriétés physico-chimiques intéressantes (mécaniques, thermiques, chimiques...) et une faible masse volumique que possèdent ces composites. Cela favorise un allègement important des structures qui entraîne, dans le secteur du transport, une réduction de la consommation de carburant et des émissions de polluants.

Cette mémoire est une contribution au développement de matériaux composites renforcés par des fibres végétales existantes dans notre pays et notamment dans la région du Boussaâda, dont la capitale est Msila. Cette région est localisée à la limite d'un grand nombre de milieux écologiques : entre le domaine subhumide, semi-aride, aride et sub-saharien [5]. La région du Boussaâda renferme plusieurs variétés de fibres végétales pouvant être utilisées comme renforts des matrices polymériques : les fibres de *Stipa tenacissima* (Alfa), *Lygeum spartum*, palmier dattier, Ediss, Agave....etc.

Dans cette mémoire, notre travail porte essentiellement sur l'extraction, et la caractérisation de deux types de fibres naturelles récoltées dans la région du Boussaâda puis l'élaboration et la

caractérisation des composites à base d'une matrice de type polyester, renforcés simultanément par les deux fibres mises en œuvre : Alfa (*Stipa tenacissima*), Agave Americana.

La partie intéressante dans cette étude est que la plante " Agave Americana " a été valorisée pour la première fois en tant que renfort des matériaux composites. Cette plante est une espèce végétale typiquement méditerranéenne issue de la famille des (Agavacées) .Il est d'une grande importance de signaler que les résultats issus de la caractérisation, physico-chimique, thermique, et mécanique sur les fibres " Agave Americana " sont comparables à ceux obtenus sur les autres types de fibres naturelles d'usage usuel.

Pour obtenir des fibres longues de bonne qualité à partir de la plante " Agave Americana " nous avons adopté une technique d'extraction biologique simple qui présente l'avantage de ne pas faire appel à des produits chimiques.

Problématique

Comment exploiter et valoriser les fibres végétales d'Agave americana et d'Alfa de la région de Boussaâda pour élaborer et caractériser des composites bio sources à matrice polyester, en particulier en termes de comportement mécanique (traction et flexion) ?

Objectif principal

- ✓ Exploitation et valorisation des fibres végétales dans la région de Boussaâda.

L'élaboration et à la caractérisation de composites bio sources à base de fibres végétales d'Agave Americana et de Alfa et d'une matrice polyester. Nous nous sommes intéressés en particulier à la réalisation et l'élaboration de quelques éprouvettes pour d'éventuels essais de traction et essais de flexion 3points indispensable dans étude de caractérisation

Cette mémoire est structurée en cinq chapitres :

Le premier chapitre est consacré à une synthèse bibliographique sur les matériaux composites renforcés par des fibres végétales. Nous exposons successivement un bref rappel sur les matériaux composites leur classification, avantages, ainsi que leurs domaines d'application. En dernière partie, nous exposons les différents types des polymères utilisés comme matrice dans les matériaux composites et les différentes techniques de leur mise en œuvre.

Le second chapitre est consacré à la présentation des différents types des fibres végétales, leur structure morphologique et leurs compositions chimique, leurs caractéristiques et propriétés mécaniques ainsi que les différentes techniques d'extraction des fibres à partir de la plante.

Le troisième chapitre est consacré à la présentation des matériaux constitutifs de nos composites unidirectionnels. Nous présentons en première partie l'endroit où nous avons récolté les deux types de plantes puis la présentation des fibres issues de ces deux plantes (Alfa (*Stipa tenacissima*), *Agave americana*) et les méthodes de leur extraction. La seconde partie du chapitre est consacrée au choix de la matrice, la présentation des différentes techniques d'élaboration des plaques de composites unidirectionnels et la technique d'évaluation du taux de fibres.

Le quatrième chapitre est réservé à la présentation des différentes techniques de caractérisation des deux types de fibres utilisées dans notre travail comme renforts du composite unidirectionnel à matrice polyester Alfa (*Stipa tenacissima*) et *Agave Americana*, les résultats obtenus et leurs discussions.

L'analyse par diffraction de rayon X (DRX) et l'infrarouge à transformée de Fourier en réflectance totale atténuée (ATR-FTIR) sont réalisées pour déterminer les propriétés physicochimiques des fibres. Enfin, l'essai de traction est utilisé pour évaluer la rigidité, la contrainte à la rupture et la déformation à la rupture des deux types de fibres.

Le dernier chapitre présente les différentes techniques de caractérisation appliquées sur les deux types de composites à matrice polyester renforcé respectivement par les fibres "Alfa (*Stipa tenacissima*)" et "*Agave americana*" suivi de la discussion des résultats obtenus. Pour mettre en valeur l'effet bénéfique de ces deux types de renfort, nous présentons également la caractérisation de la résine pure en polyester. Les différentes caractérisations utilisées portent sur la technique des essais de traction et les essais de flexion trois points. Les résultats obtenus sur les deux types de composites sont discutés en fonction de ceux de la résine pure en polyester.

Références

- [1] Salit, M. S. (2014). Tropical natural fibre composites. *Tropical Natural fibers and their properties*, 15.
- [2] Newman, R. H., Le Guen, M. J., Battley, M. A., & Carpenter, J. E. (2010). Failure mechanisms in composites reinforced with unidirectional Phormium leaf fibre. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 41(3), 353-359..
- [3] Sreenivasan, V. S., Somasundaram, S., Ravindran, D., Manikandan, V., & Narayanasamy, R. (2011). Microstructural, physico-chemical and mechanical characterisation of Sansevieria cylindrica fibres—An exploratory investigation. *Materials & Design*, 32(1), 453-461.
- [4] Sahu, J. (2013). *Study of tensile and flexural properties of luffa fiber reinforced epoxy composite* (Doctoral dissertation).
- [5] Cherif, K. (2014). *Etude éco-épidémiologique de la Leishmaniose cutanée dans le bassin du Hodna (M'Sila)* (Doctoral dissertation, Université de Sétif 1-Ferhat Abbas).

Partie bibliographique

CHAPITER I : Généralité sur

les matériaux composites

Chapitre I. Généralité sur les matériaux composites

I.1. Introduction

Les premières utilisations des composites remontent aux années 1500 avant J.-C. lorsque les premiers Égyptiens et les colons mésopotamiens utilisaient un mélange de boue et de paille pour créer des bâtiments solides et durables. La paille a continué à renforcer les produits composites anciens, y compris la poterie et les bateaux. Plus tard, en 1200 après JC, les Mongols ont inventé le premier arc composite. En utilisant une combinaison de bois, d'os et de « colle animale », les arcs étaient pressés et enveloppés d'écorce de bouleau. Ces arcs étaient extrêmement puissants et extrêmement précis [1]. Aujourd'hui, la croissance des matériaux composites avec des matrices métalliques, élastomères, polymères ou même céramiques offre aux fabricants et aux concepteurs de nouvelles possibilités de combiner fonction, forme et matériaux pour la production de systèmes de plus en plus efficaces. De nouveaux procédés de production, d'industrialisation et de conception structurelle, qui vont étendre les possibilités techniques et mieux, répondent à des besoins parfois contradictoires (fonction, résistance, rigidité...) que les matériaux de construction classiques ne fournissent pas facilement. Tout dégage la compétition entre l'utilisation des matériaux composites et les matériaux classiques est encore difficile [2].

I.2. Définition des matériaux composites

Dans le sens général, le mot composite signifie une combinaison macroscopique de deux ou plusieurs matériaux distincts ayant une interface finie entre eux [3]; avec des propriétés physiques et chimiques différentes. Lorsqu'ils sont combinés, ils créent un matériau qui est spécialisé pour faire un certain travail par exemple pour devenir plus fort ou plus résistant que les composants pris séparément [4]. Un matériau composite est également défini comme tout alliage ou matière première comprenant un renfort dans l'association intime d'au moins deux composants : le renfort et la matrice, qui doivent être compatibles entre eux et devenir unis, qui introduit la notion d'agent de liaison, l'interface. Contrairement aux matières premières conventionnelles, dont les caractéristiques mécaniques sont connues à l'avance, ceux des composites ne sont vraiment connus qu'après fabrication, car le matériau et le produit sont produits en même temps. Actuellement, les composites à matrice organique représentent plus de 99 % des matériaux composites; cependant, il existe également des composites à matrice inorganique (métallique ou céramique), dont la diffusion est encore marginale [5].

Les bio-composites sont définis comme des composites biocompatibles et/ou écologiques. Ils sont composés d'une grande variété de composants organiques et / ou inorganiques, tels que des polymères synthétiques et naturels, des polysaccharides, des sucres, des protéines, des métaux et des nano carbones, des céramiques. Les bio-composites sont présents sous diverses formes, telles que les membranes, films, revêtements, moulures, fibres et mousses, particules [6].

I.3. Classification des matériaux composites

Les composites, habituellement utilisés dans l'aviation et l'aérospatiale, le transport, la défense militaire et d'autres industries, sont fabriqués à partir de deux ou plusieurs matériaux constitutifs avec des caractéristiques physiques ou propriétés Chimiques.

I.3.1. Composite hautes performances (HP)

Désignent les composites renforcés avec des fibres haute performance, dont le carbone, le verre, l'aramide, le polyéthylène à très haut poids moléculaire, la céramique, le quartz, le bore et les nouvelles fibres telles que les fibres poly (p-phényle benzobisthiazole). Ces fibres ont toutes des propriétés de performance exceptionnelles, telles qu'un module élevé, une ténacité élevée et une résistance thermique élevée. Les matrices utilisées en HPC sont principalement des polymères (résine époxy, résine bakélite, résine polyester insaturée, etc.), des métaux (aluminium, magnésium, etc.), des alliages (alliage d'aluminium, alliage de magnésium, etc.) et des céramiques (oxyde d'aluminium, zircon, nitrure de silicium, carbure de silicium, etc.) [6].

I.3.2. Composite grandes diffusions (GD)

Les composites «Larges diffusions LD" se caractérisent par des propriétés mécaniques faibles mais moins chers à produire en grandes séries que les composites HP ; ils sont utilisés dans la fabrication de pièces de toutes sortes [7]. Les composites à grande diffusion représentent 95 % des composites utilisés. Il s'agit généralement de plastiques renforcés par des fibres courtes, le taux de renforcement étant d'environ 30 %. Dans plus de 90 % des cas, les principaux constituants de base sont les résines de polyester, dont 95 % sont des thermodurcissables avec des fibres de verre dans 99 % des renforts utilisés [8].

I.4. Avantage des matériaux composites

Les matériaux composites disposent d'atouts importants par rapport aux matériaux traditionnels. Ils apportent de nombreux avantages fonctionnels à savoir [22]:

- légèreté
- résistance mécanique et chimique
- maintenance réduite
- liberté de formes
- tenue aux chocs et au feu
- isolation thermique et/ou phonique

I.5. Domaines d'utilisation

Les fibres végétales ne sont plus seulement utilisées dans le textile. Toutefois, elles collaborent également pour créer de nouveaux matériaux. Ces matériaux innovants font leur apparition dans d'autres domaines industriels.

Les premières expériences d'introduction des fibres végétales dans le domaine de l'automobile remontent aux années 40. En 1941, la voiture « plastic » a été créée par H. FORD en utilisant des polymères d'origine végétale. En dépit de sa production restreinte, l'idée de l'exploitation de cette ressource naturelle est devenue réelle. Les matériaux composites provenant des plantes sont devenus pertinents dans ce domaine industriel.

En effet, les fibres végétales jouent un rôle dans la diminution du poids des véhicules, ce qui augmente le taux d'émission de CO₂. Aujourd'hui, les grandes entreprises automobiles fabriquent des éléments fabriqués à partir de fibres végétales, comme les accoudoirs, les tablettes arrière, la garniture de porte, le dossier de siège, etc. Les différentes pièces automobiles bio-composites sont illustrées dans la ([Figure.I.1](#))

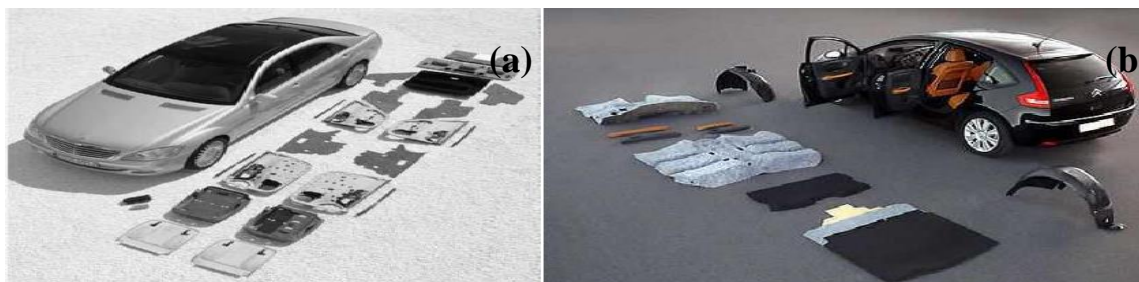


Fig.I. 1 Pièces bio-composite à différentes fibres végétales :(a) Mercedes classe S [2](b) Voiture PSA [3]

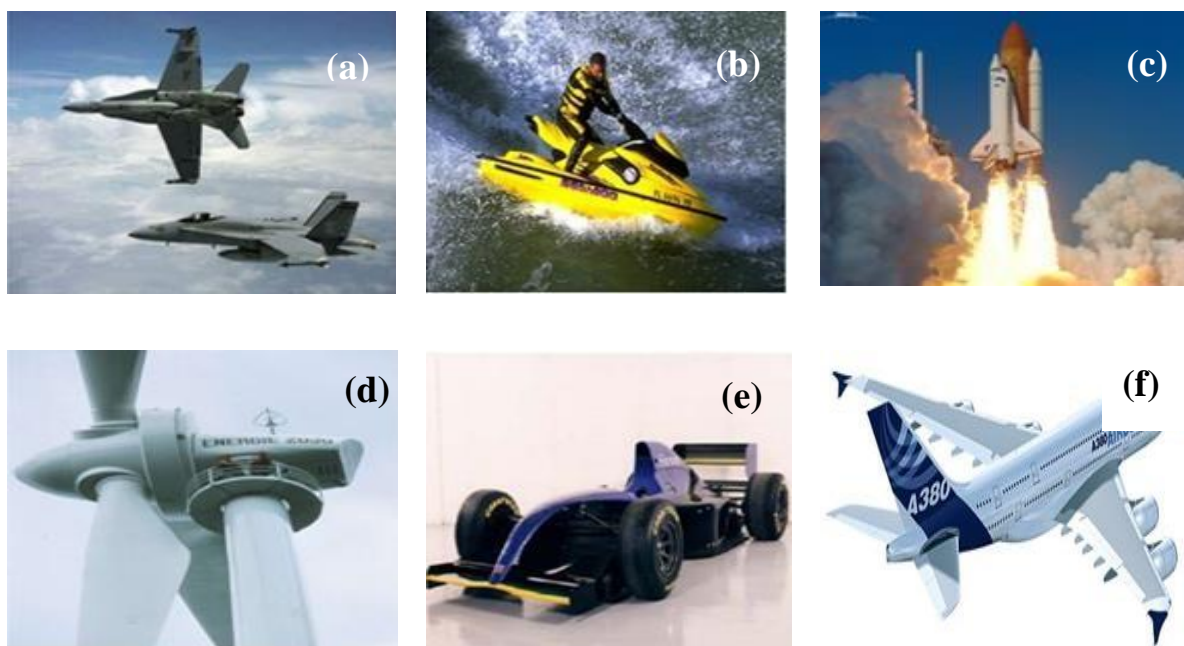


Fig.I. 2 Domaines d'application des matériaux composites : (a) Militaire ;(b) Industrie navale ;(c)Aérospatiale ;(d) Énergie ;(e) Sport ;(f) Aéronautique

I.6. Constituants de base des matériaux composites

Les composants de base des matériaux composites sont le renforcement, le dimensionnement et la matrice, qui en général est appelé le système de résine pendant le traitement et la matrice dans la phase consolidée. Les fibres portent la majorité de la charge et fournissent la plupart de la rigidité du matériau [10].

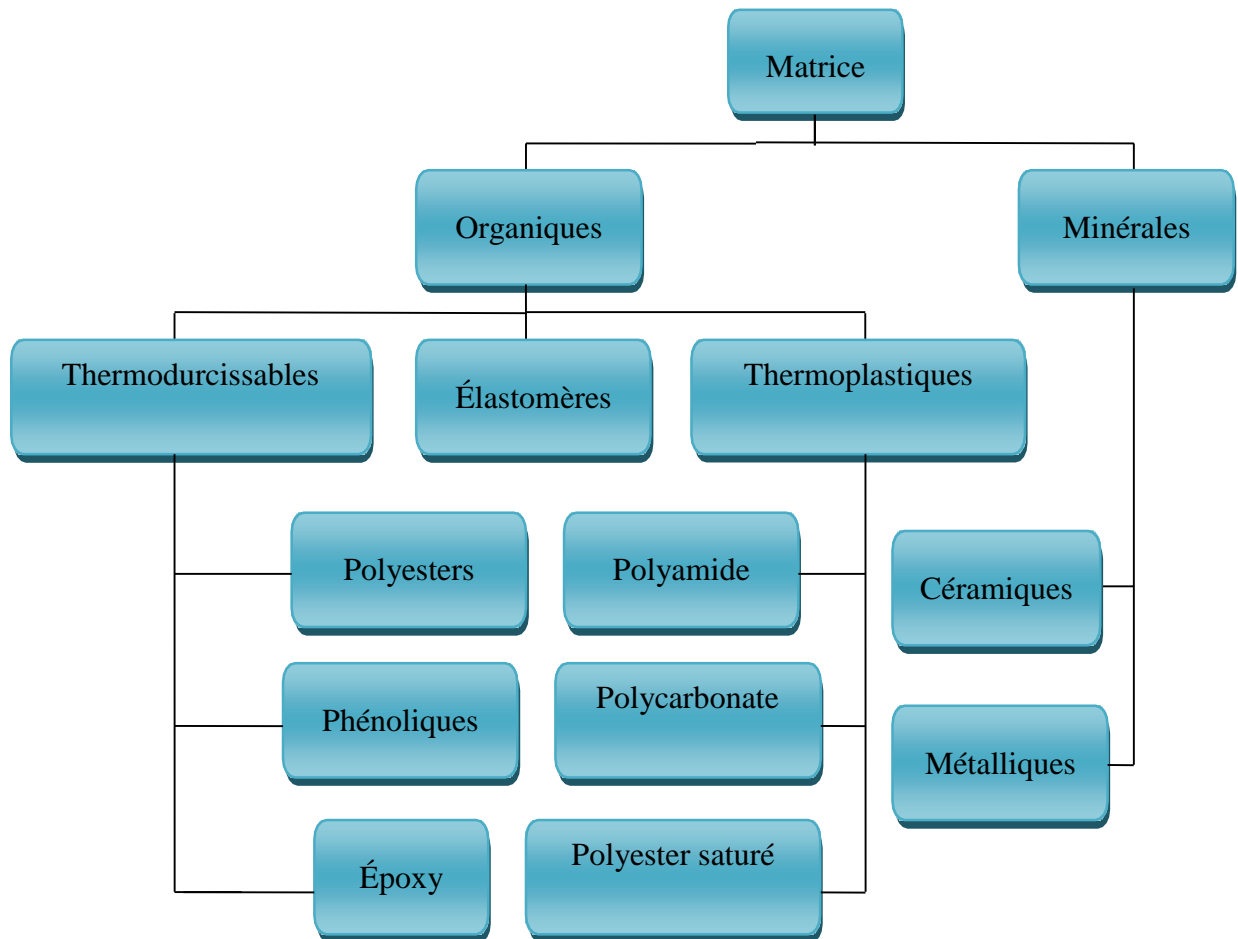


Fig.I.3 Différentes familles de matrices

I.6.1. Matrice

La matrice est l'un des deux principaux constituants de base des matériaux composites. Le rôle principal de la matrice est de :

- Maintenir les renforts en place.
- Assurer leur cohésion et leur protection.
- Il est généralement homogène et isotrope.

Il existe des matrices céramiques, des matrices métalliques, des matrices minérales et des matrices organiques. Actuellement, les résines thermodurcissables (TS) sont principalement utilisées en combinaison avec des fibres longues, mais l'utilisation de polymères thermoplastiques (TP) renforcés avec des fibres courtes se développe fortement. Les principales résines thermodurcissables sont les polyesters largement utilisés, les résines époxy (ou époxydes) qui sont la résine standard pour les composites HP et les résines phénoliques. Les principales résines thermoplastiques utilisées dans les composites sont le polypropylène (PP), les polyamides (PA) [11].

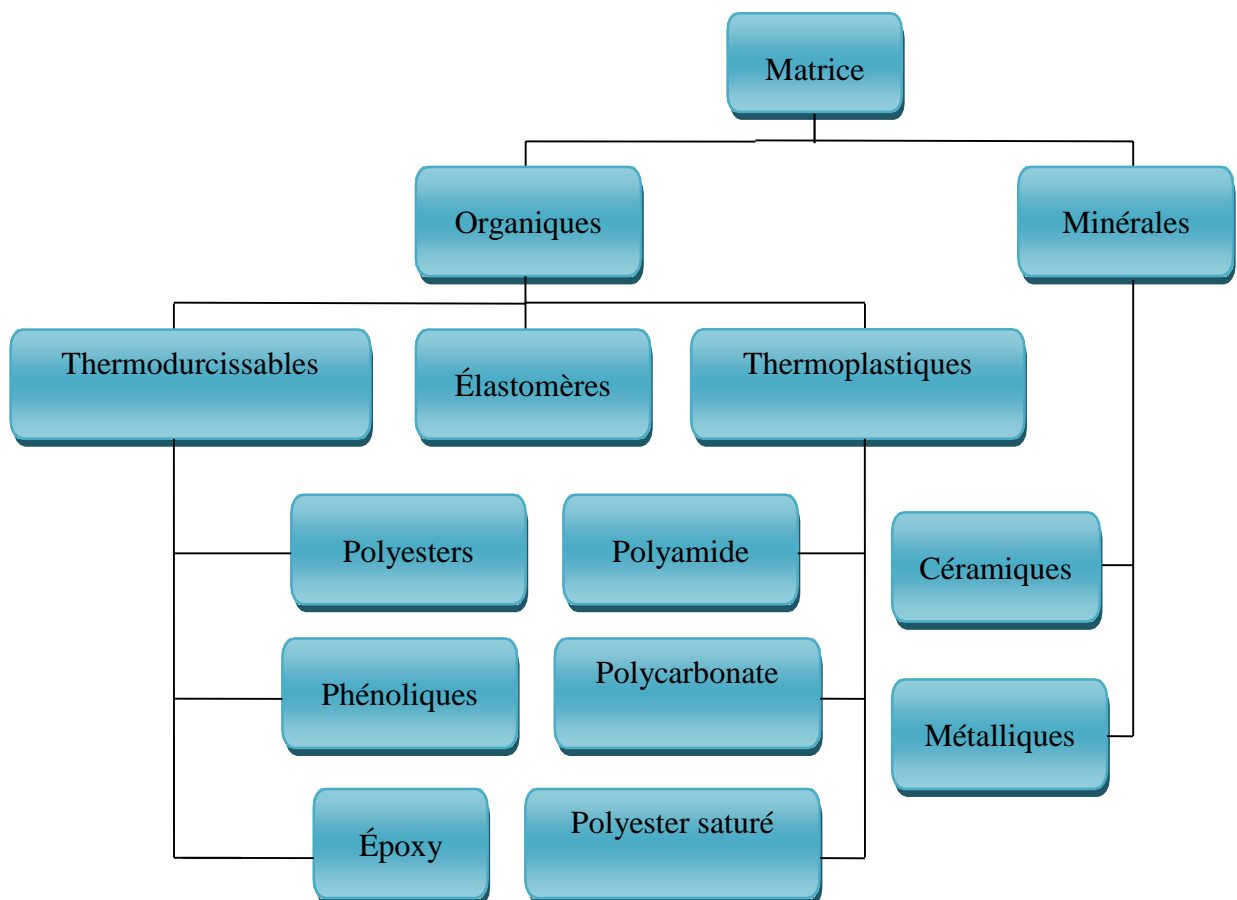


Fig.I. 4 Différentes familles de matrices

I.6.1.1. Résines thermodurcissables (TD)

Les thermodurcissables sont des solides infusibles et insolubles qui forment un réseau tridimensionnel à partir de segments moléculaires liés entre eux par une forte densité de liaisons covalentes. Les thermodurcissables sont formés de manière irréversible par des réactions chimiques entre la résine et le durcisseur, ce qui assure la création de ponts entre les différentes chaînes moléculaires du polymère. Compte tenu de leur faible viscosité avant durcissement, les thermodurcissables sont largement utilisés comme matrice dans les matériaux composites. On peut citer les polyesters insaturés (vinyliques, dérivés allyliques, polyesters condensés, etc.), les résines époxy, les résines de condensation (phénoliques, aminoplastes, furaniques, etc.) [12].

Tableau I. 1 Caractéristique mécaniques de résines TD thermodurcissables usuelles [21]

Matrice TD	$\rho(\text{kg/m}^3)$	E (Mpa)	G (Mpa)	ν	$\sigma_r(\text{Mpa})$	A%
Époxydes	1200	4500	1600	0.4	130	2
Phénoliques	1300	3000	1100	0.4	70	2.5
Polyesters	1200	4000	1400	0.4	80	2.5
Vinyliques	1150	3300	–	–	75	4
Polycarbonates	1200	2400	–	0.35	60	–
Silicones	1100	2200	–	0.5	35	–
Uréthanes	1100	700 à 7000	–	–	30	100
Polyamides	1400	4000 à 19000	1100	0.35	70	1

I.6.1.2. Résines thermoplastiques (TP)

Les thermoplastiques sont des dérivés de monomères linéaires ou légèrement ramifiés qui forment l'unité de base d'une chaîne où ils sont répétés de nombreuses fois. Sous l'action de la chaleur, le thermoplastique se ramollit, ce qui entraîne l'apparition de mouvements à longue portée dans les chaînes moléculaires. Les thermoplastiques peuvent ensuite être solidifiés en les refroidissant pour leur donner la forme souhaitée. Ce processus de ramollissement par excitation thermique et de durcissement par refroidissement peut être répété indéfiniment car, contrairement aux résines thermodurcissables, les thermoplastiques ne sont pratiquement pas affectés par les changements

chimiques. Il s'agit plutôt d'un changement dans l'arrangement intermoléculaire. Cette capacité confère aux déchets thermoplastiques des propriétés de recyclage très intéressantes [12].

Les principales résines thermoplastiques utilisées dans la fabrication des composites sont les suivantes :

- les polyamides (PA)
- les polyéthylènes téréphtalates (PET) et butyléniques (PBT)
- l'oxyde de polyphénylène (PPO ou PPE)
- le polyoxyméthylène (POM)
- le polypropylène (PP) est un polymère semi-technique, peu coûteux, assez stable en température, mais combustible.

Autres thermoplastiques Les matrices commencent à être utilisées pour leurs propriétés de thermo stabilité (résistance thermique supérieure à 200°C) et leur bonne résistance mécanique :

- polyamide-imide (PAI)
- polyéther-imide (PEI)
- polyéther sulfone (PES)
- polyéther-éther-cétone (PEEK)

Tableau I.2 Caractéristique mécaniques de résines TD thermoplastiques usuelles [21]

Matrices TP	ρ (kg/m)	E (Mpa)	G (Mpa)	u	σ_r (Mpa)	A%
PP	900	1200	–	0.4	30	20 à 400
PPS	1300	4000	–	–	65	100
PA	1100	2000	–	0.35	70	200
PES	1350	3000	–	–	85	60
PEI	1250	3500	–	–	105	60
PEEK	1300	4000	–	–	90	50

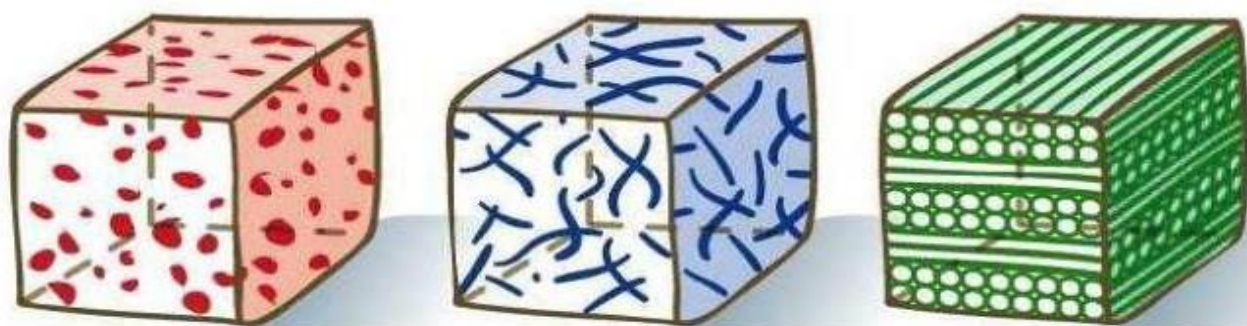
Tableau I.3 Comparaison entre les caractéristiques des résines (TP) et (TD) [21]

	Thermoplastique	Thermodurcissable
État de base	Solide – prête à l'emploi	Liquide visqueux
Stockage	Illimité	Réduit (précautions à prendre)
Mouillabilité des renforts	Difficile	Facile
Moulage	Chauffage+ refroidissement	Chauffage continu
Cycle	Court	Long(x2) (polymérisation)
Terme au choc	Assez bonne	Limitée
Terme thermique	Réduite (<130°)	Meilleure (>150°)
Chutes et déchets	Recyclable	Perdus ou utilisés comme
Condition de travail	Propreté	Émanation de COV

I.6.2. Renfort

Le renfort est généralement composé d'un matériau plus dur que la résine, son rôle principal est d'assurer une grande résistance au matériau, notamment à la traction, et qui se présente généralement sous la forme de fibres (diamètres de 5 à 20 μm) (Fig.I.5).

- fibres longues unidirectionnelles (carbone, verre)
- longues fibres tissées (tissus 3D et 2D)
- fibres courtes distribuées aléatoirement sans direction préférentielle (mat)



1. Composite de particules
2. Composite de fibres courtes
3. Familles de composites de fibres longues

Fig.I. 5 Structures géométriques des renforts composites à fibres longues, à fibres courtes et à particules.

Les fibres sont de type organique (fibres de polyamide, polyester, polypropylène...), végétal et animal. Et inorganiques (fibres de verre, carbone, silice) ou naturelles (cellulose). En général, elles présentent d'excellentes caractéristiques mécaniques [11]. En fonction des propriétés mécaniques recherchées, il existe plusieurs architectures de renfort pour les composites, unidimensionnelle où les fibres sont orientées dans la même direction, bidimensionnelle comme dans le cas des surfaces tissées ou non tissées et tridimensionnelle avec des fibres orientées dans plusieurs directions dans l'espace [14]. Les principaux matériaux de renforcement utilisés pour les composites plastiques sont : les fibres de verre, de carbone et d'aramide les fibres de verre, de carbone et d'aramide (Fig.I.6).

[Attirez l'attention du lecteur avec une citation du document ou utilisez cet espace pour mettre en valeur un point clé. Pour placer cette zone de texte n'importe où sur la page, faites-la simplement glisser.]

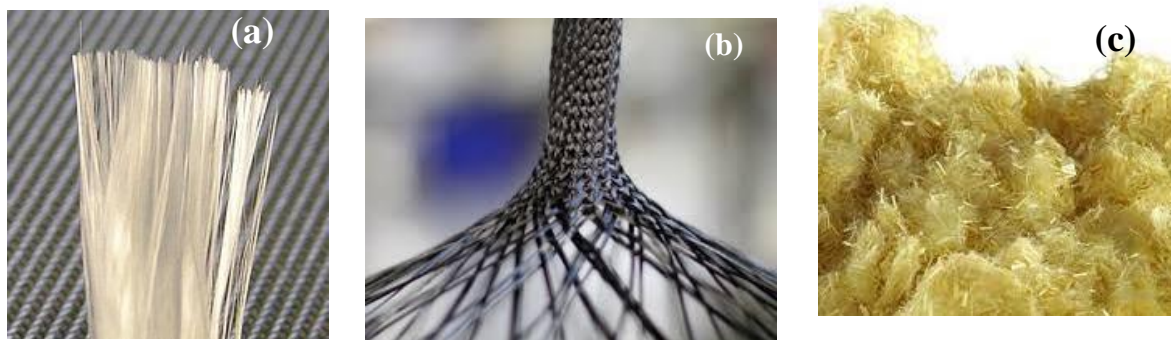


Fig.I. 6 Les principales fibres: (a) fibres de verre, (b) fibres de carbone, (c) fibres d'aramide.

I.6.2.1. Fibre de verre

Fibres de verre Dans sa forme massive, le verre se caractérise par une grande fragilité et une forte sensibilité à la fissuration. Au contraire, le verre utilisé sous forme de fibres de petit diamètre présente de très bonnes caractéristiques mécaniques. Ces fibres de verre sont obtenues par extrusion du verre à travers une filière percée de trous de 1 à 2 mm de diamètre. Les fibres de verre sont ensuite étirées jusqu'à des diamètres de 5 à 15 μm ; à la fin du processus, elles sont enduites et enroulées (roving) (Figure.I.7). Les fibres de verre constituent le renfort essentiel des composites à grande diffusion. Elles sont obtenues à partir de sable (silice) et d'additifs (alumine, carbonate de chaux, magnésie, oxyde de bore). [15].



Fig.I. 7 Fibres de verre

Ils ont un excellent rapport performance-prix qui les place au premier rang des renforts utilisés dans la construction. Nous distinguons trois types de fibres:

E: pour les composites de grande Diffusion et les applications courantes

R: pour les composites hautes performances

D: pour la fabrication de circuits Imprimés (propriétés diélectriques).

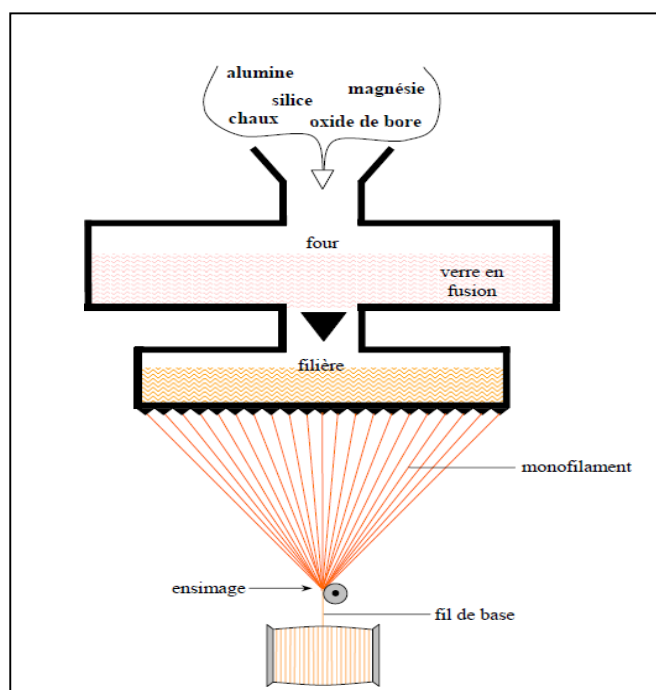


Fig.I. 8 Processus d'élaboration des fibres de verre

I.6.2.2. Fibre de carbone

Elles sont fabriquées à partir de fibres polymères de base appelées précurseur qui se présente lui-même sous la forme de fibres orientées préalablement tissées, et carbonisées sous tension en plusieurs étapes, oxydation (100 à 200 C°), puis pyrolyse (1500-2500 C°). Selon la température et le temps de cuisson, les fibres ont une "haute résistance" (HS) ou un "haut module" (HM). En général, on utilise comme précurseur des fibres acryliques fabriquées à partir de poly acrylonitrile (PAN) [11] (Figure.I.9). Il s'agit de la fibre la plus couramment utilisée dans les applications à hautes performances. Les fibres sont produites à partir de précurseurs chimiques tels que le poly acrylonitrile ($[\text{CH}_2\text{-CH-CH}]_n$). Elles sont notamment utilisées pour renforcer certains matériaux composites. Les fibres de carbone présentent certains avantages:

- Elles sont rigides
- Elles résistent bien à la traction, ainsi qu'à la compression.
- Elles sont près de 70% plus légères que l'acier.
- Ces caractéristiques sont d'un grand intérêt pour l'industrie.



Fig.I. 9 Fibres acryliques en poly acrylonitrile (PAN)

I.6.2.3. Fibre d'aramide (Kevlar)

L'aramide est un polymère de la famille des aramides ou polyamides aromatiques, connu et commercialisé depuis les années 1970 sous le nom de Kevlar, est constitué d'anneaux benzéniques séparés par des groupes amides. La fibre aramide Kevlar possède des propriétés très intéressantes pour l'industrie. Elle se caractérise par une excellente résistance à la traction, aux chocs et à l'usure. Ce type de fibre est principalement utilisé dans la fabrication de gilets pare-balles et dans l'industrie aéronautique. ([Figure.I.10](#)) [11].



Fig.I. 10 Fibres d'aramide (Kevlar)

Architecture des armatures La plupart des armatures fonctionnent bien en traction, mais offrent de moins bonnes performances en compression et en cisaillement. Il est donc impératif de jouer sur la texture et la géométrie des armatures pour créer une architecture améliorée. Les armatures sont assemblées afin de faciliter leur mise en forme. On peut distinguer plusieurs catégories de renforts :

- Les mats.
- Tissus UD (unidirectionnels).
- Tissus bidirectionnels.
- Tissus multidirectionnels.

I.6.2.4. Mats

Les mats sont des nappes de fils continus ou discontinus aléatoirement distribués dans un plan sans aucune orientation préférentielle (Figure I.11.a). Ils sont maintenus ensemble par un liant soluble ou non dans les résines, suivant la mise en œuvre. L'absence d'orientation préférentielle des fibres conduit à une isotropie des propriétés mécaniques du mat dans son plan. [11, 13].

I.6.2.5. Unidirectionnel (UD)

Dans une nappe UD, les fibres sont assemblées parallèlement les unes par rapport aux autres à l'aide d'une trame très légère [11] Taux de déséquilibre très grand (Figure I.11.b).

I.6.2.6. Tissus

Le tissu destiné au renforcement des composites est une surface flexible (Figure I.11.c), constituée par un assemblage régulier de fils tissés ou torsadés, obtenus en entrelaçant les brins selon deux directions perpendiculaires, chaîne et trame. Ils peuvent avoir des tissages différents [11]. On distingue principalement: toile ou taffetas, sergé et satin (Figure I.12).

I.6.2.7. Taffetas (toile ou tissu)

Chaque fil de chaîne passe sur puis sous chaque fil de trame, et inversement (Figure I.12.a). Le tissu présente une bonne planéité et une relative rigidité, mais est peu déformable pour la mise en œuvre. Les nombreux entrecroisements successifs génèrent un voile important et réduisent les propriétés mécaniques [16].

I.6.2.8. Sergé

Chaque fil de chaîne flotte sur plusieurs (n) fils de trame et chaque fil de trame flotte sur (m) fils de chaîne (Figure I.12.b). Une armure plus souple que le taffetas avec une bonne densité de fils [16].

I.6.2.9. Satin

Chaque fil de chaîne flotte sur plusieurs (n-1) fils de trame et vice versa (Figure I.12.c). Ces tissus ont des aspects différents de chaque côté. Ces tissus sont assez souples et conviennent à la mise en forme de pièces aux surfaces complexes. Ce type de tissu a un poids spécifique élevé [16].



Fig.I.11 Différentes architectures des renforts de composites : (a) mats de verre, (b) tissu unidirectionnel (UD), (c) tissu bidirectionnel

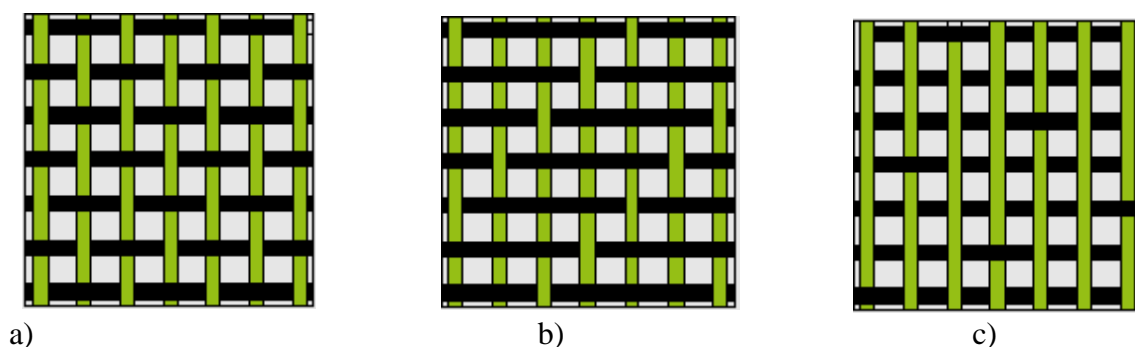


Fig.I. 12 Tissus bidirectionnels: a) Le taffetas, b) Le sergé, c) Le satin

I.7. Structure des matériaux composites

Les structures des matériaux composites peuvent être classées en trois types : les monocouches, les stratifiés et les sandwichs.

I.7.1. Monocouche

Les monocouches (Figure I.13) représentent l'élément de base de la structure composite. Les différents types de monocouches sont caractérisés par la forme du renfort: fibres longues (unidirectionnelles UD, distribuées aléatoirement), fibres tissées, fibres courtes [17].



Fig.I. 13 Monocouche UD (pli unidirectionnel)

I.7.2. Stratifiés

Les structures composites stratifiées (Figure I.14) sont constituées de couches successives de renforts imprégnés de résine. Les couches sont également appelées plis. Les structures stratifiées en matériaux composites sont constituées d'empilements de plis unidirectionnels ou bidirectionnels. Ces plis sont constitués de renforts en fibres longues liés par de la résine. Le rôle du renfort est d'assurer la fonction de résistance mécanique [17].

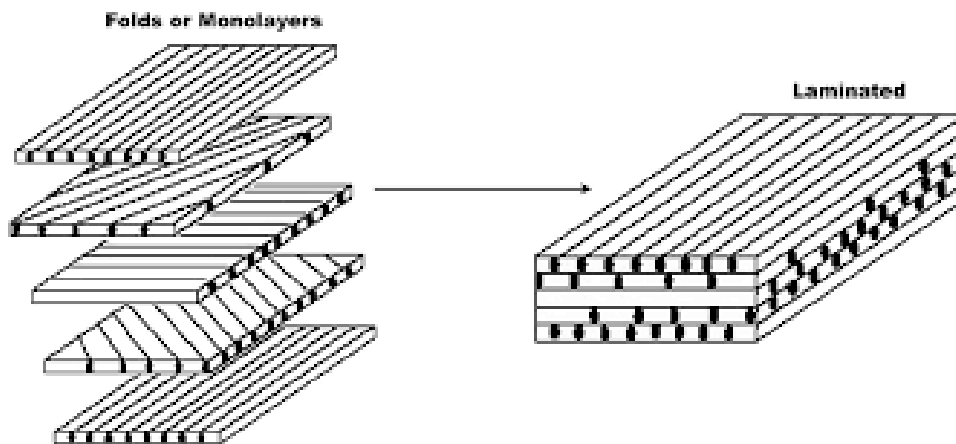


Fig.I. 14 Laminé composé de plusieurs monocouches ayant des orientations différentes

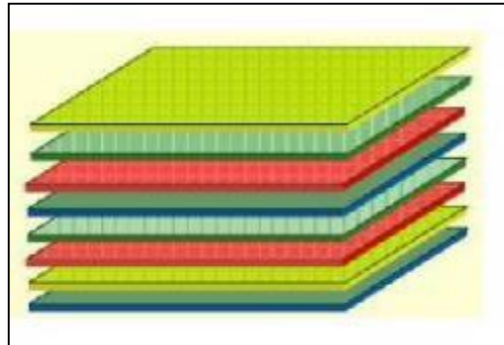


Fig.I 15. Composite stratifiée

I.7.3. Sandwichs

Ces matériaux sont composés de deux peaux très rigides et minces enveloppant un noyau très épais et faible. L'ensemble forme une structure très légère. L'assemblage des peaux avec l'âme se fait généralement par collage, par soudage ou par polymérisation dans des moules dans le cas des composites plastiques. Les âmes peuvent être pleines (bois, mousse, etc.) ou creuses (alliages de métaux légers, papier, etc.). Les peaux sont généralement des stratifiés ou des feuilles d'alliages légers (Figure I.16). Les noyaux les plus couramment utilisés sont des nids d'abeille ondulés ou de la mousse [18]. Les matériaux les plus couramment utilisés sont

- Pour les noyaux solides
 - balsa ou bois cellulaire
 - diverses mousses cellulaires
 - les résines remplies de microsphères de verre creuses, appelées mousses syntactiques
- pour les noyaux creux, principalement le nid d'abeille et les profilés
 - alliages de métaux légers
 - le papier kraft (enduit de résine ou non)
 - papier polyamide, tel que le papier Nomex.

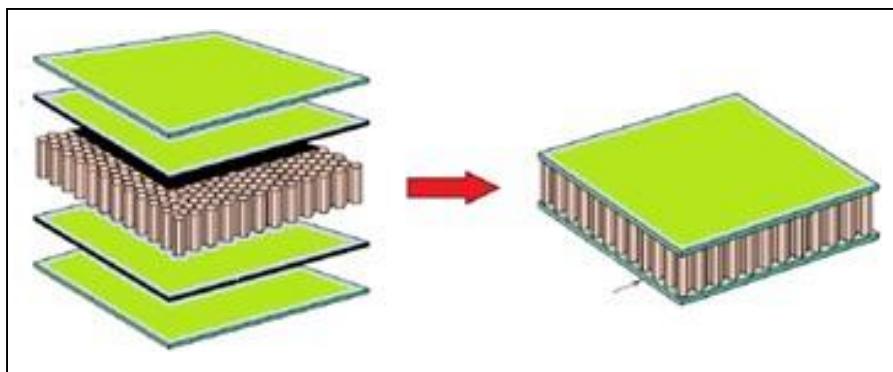


Fig.I. 16 Composite sandwich

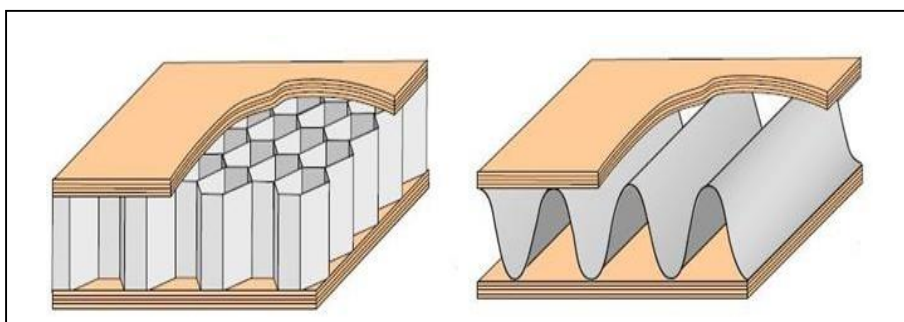


Fig.I. 17 Composite sandwich

I.8. Mise en œuvre des matériaux composites

L'élaboration d'un matériau composite se déroule généralement en trois opérations essentielles qui sont :

- l'imprégnation du renfort par la résine
- Mise en forme à la géométrie de la pièce dans des moules
- le durcissement du système.

I.8.1. Moulage par transfert de résine (RTM)

Le moulage par transfert de résine (RTM : Résine Transfer Molding) est une procédé de mise en forme des composites à matrices thermodurcissable. Dans ce procédé, les fibres séchées sont positionnées dans la cavité d'un moule fermé et chauffé (Figure I.18). La résine est transférée dans la cavité du moule au moyen d'une variété d'équipements tels que par la pression ou par le vide. Les résines qui sont normalement utilisées dans ce procédé concernent le polyester, époxy, ester vinylique et phénolique [16]. Cette technique utilisant un moule fermé présente l'avantage de minimiser le

dégagement des gaz nocifs, de contrôler le taux de renfort et d'obtenir un bon état de surface de deux faces de la pièce.

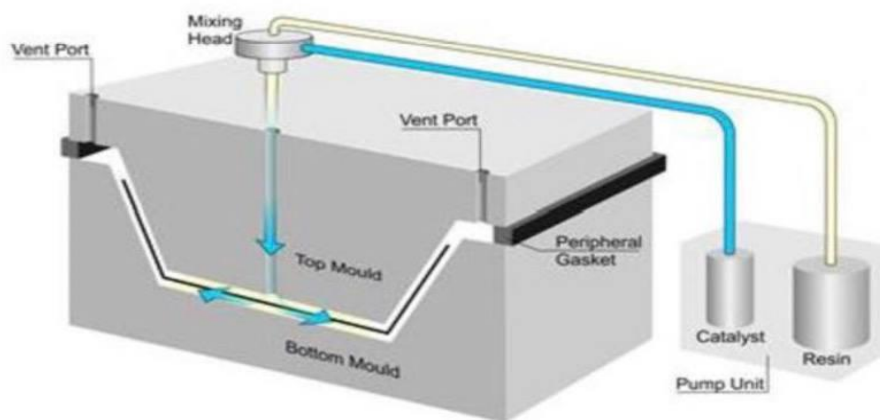


Fig.18 Schéma de principe de la technique de Moulage par transfert de résine [65]

I.8.2. Moulage au contact

C'est un procédé manuel de réalisation de structures à partir de résines thermodurcissables. Son principe consiste à imprégner manuellement les renforts placés dans un moule à température ambiante et sans pression. Après durcissement de la résine, la pièce est démoulée. Le moulage au contact (Figure I.19) est un procédé peu coûteux utilisé pour produire des pièces de toutes formes mais à très faible cadence [11].

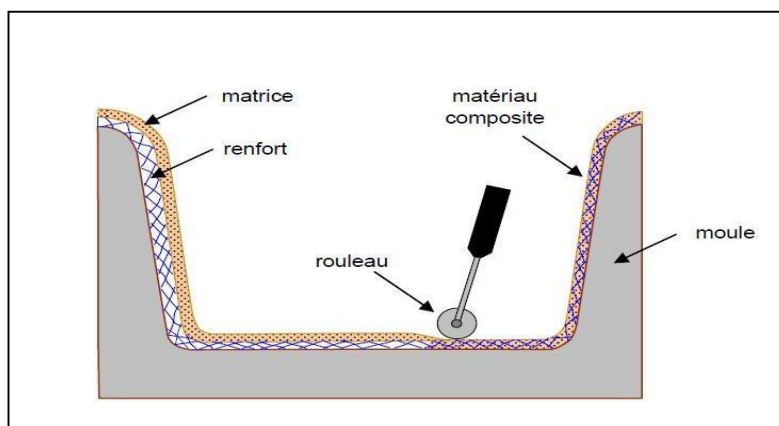


Fig.I. 19 Moulage au contactFigure

I.8.3. Moulage par projection simultanée

Le moulage est réalisé par projection simultanée (Figure I.20) des fibres coupées et de la résine catalysée sur un moule. L'équipement de projection est constitué d'une machine à découper le stratifié et d'un pistolet projetant la résine et les fibres.

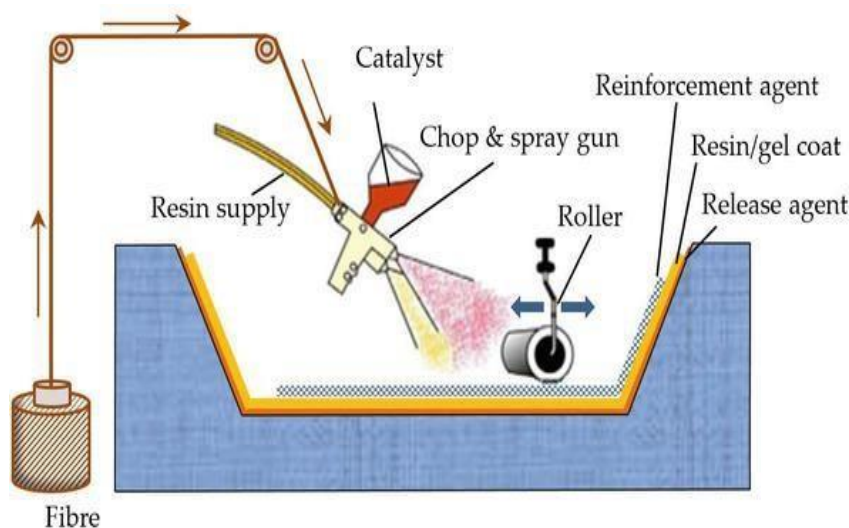


Fig.I.20. Moulage par projection

Coupées, le tout fonctionnant à l'air comprimé. La couche de fibres imprégnée de résine est ensuite compactée et les bulles sont éliminées à l'aide d'un rouleau rainuré [19].

I.8.4. Moulage par injection

Le moulage par injection (Figure I.21) est la méthode la plus courante de transformation des thermoplastiques renforcés (les autres méthodes étant l'extrusion, le moulage par soufflage, le thermoformage, etc.) Le moulage par injection est réalisé sur des presses conventionnelles utilisées pour l'injection de résines thermoplastiques. Des granulés contenant de la résine et des renforts (fibres courtes, billes, etc.) ou des matelas pré-imprégnés sont extrudés à l'aide d'une vis d'Archimède. La matrice est fluidifiée par chauffage et injectée sous haute pression dans un moule chauffé, où a lieu la polymérisation. Le type de matériaux obtenus est plus généralement appelé "plastiques renforcés" que matériaux composites. En effet, en raison de la nature des renforts (fibres courtes, sphères, etc.), la contrainte à la rupture et le module d'Young des résines sont multipliés par un facteur d'environ 2 à 4. Cette technique est adaptée à la production de pièces en très grandes séries [19].

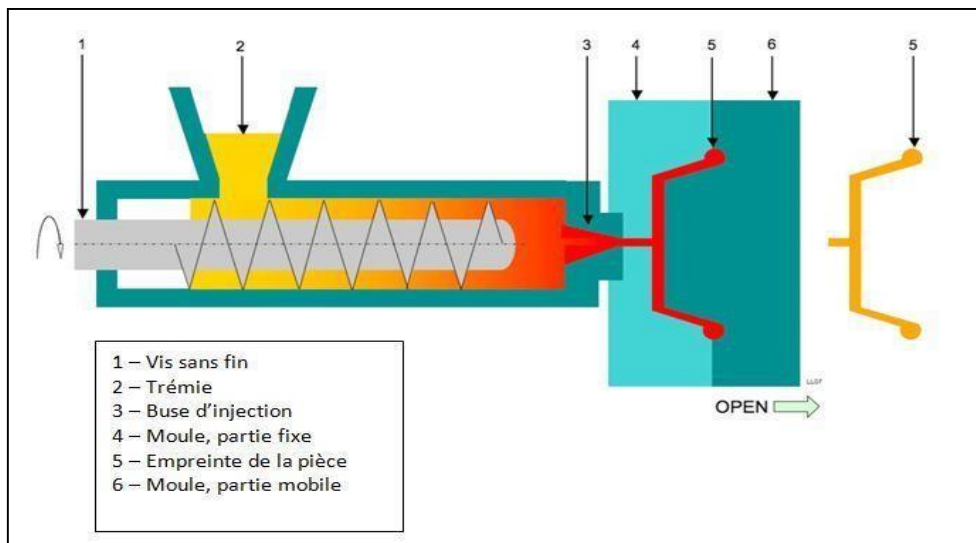


Fig.I. 21 Moulage par injection

I.8.5. Moulage par compression

Le moulage des matériaux composites par la technique de la compression à basse pression est réalisé à l'aide d'une presse à compression, d'un moule et d'un contre-moule rigide. Le matelas (renfort) est d'abord placé sur le moule inférieur. La résine est ensuite versée sur le matelas. La presse est ensuite fermée et mise sous pression. Le moule et le contre-moule pressent la résine et le matelas ensemble, les forçant à former un matériau composite et à s'étaler uniformément, en évacuant l'excédent de matériau par les trous prévus à cet effet. Lorsque le matériau est dur, les moules peuvent être séparés pour le démoulage. Dans certains cas, une étape d'ébavurage est nécessaire [20].

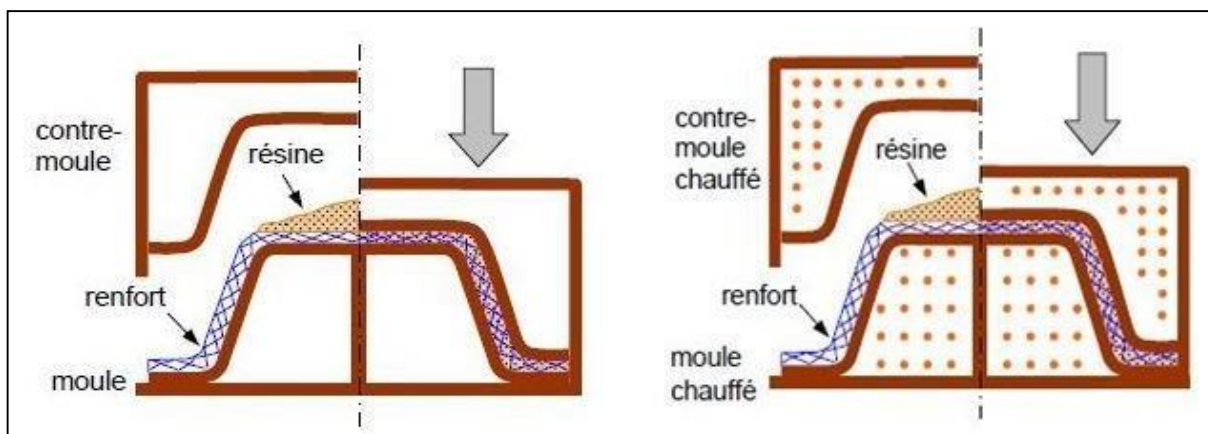


Fig.I. 22 Moulage par compression

I.8.6. Enroulement du filament

Le renfort (fil continu, ruban, etc.) imprégné de résine catalysée est enroulé avec une légère tension sur un mandrin cylindrique ou rotatif (Figure I.23). Ce type de moulage est bien adapté aux surfaces cylindriques et sphériques et permet une conception avancée des pièces. Les laminés obtenus peuvent avoir des proportions élevées de renfort (jusqu'à 80 % en volume), ce qui permet d'obtenir des caractéristiques mécaniques élevées. L'investissement dans l'équipement est très important. En fonction des mouvements relatifs du mandrin et du système d'alimentation en renfort, on obtient différents types d'enroulements (et donc de stratifications). On distingue : l'enroulement circonférentiel, l'enroulement hélicoïdal, l'enroulement polaire [18].

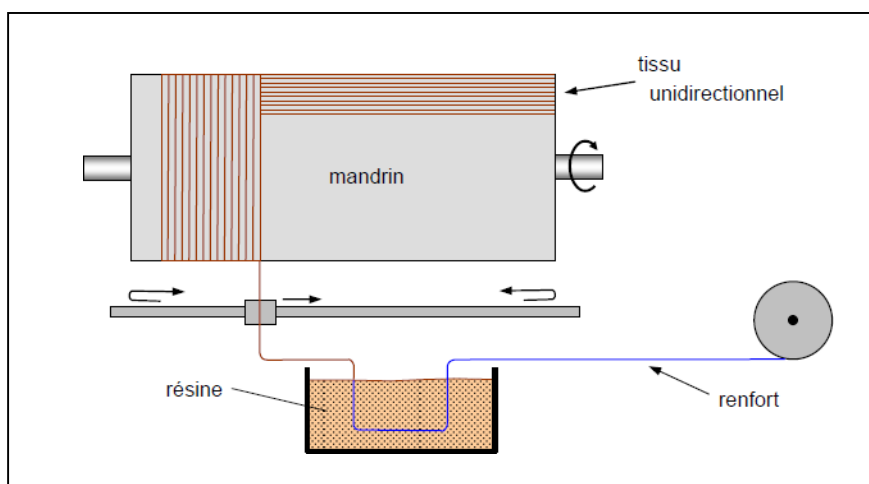


Fig.I. 23 Moulage par enroulement filamentaire

I.8.7. Moulage par pultrusion

La pultrusion est un procédé industriel modulable de fabrication de matériaux composites à matrice organique (thermoplastique ou thermodurcissable), qui permet l'obtention en continu de profilés de section géométrique constante (Figure I.24).

Comme exemples de produits pultrudés, citons :

- en génie électrique : chemins de câble, perches isolantes, échelles
- parmi les applications anticorrosion : conduites pour fluides, garde-corps, boulonnerie.
- en sports et loisirs : cannes de hockey, bâtons de ski, cannes de golf, flèches, lattes de voile ou de cerf-volant.

- dans le bâtiment : boulons d'ancrage, panneaux de façade, câbles de traction, poutres, signalisations, fenêtres, bancs de stade.
- dans les transports : assemblages de panneaux isolants [11].

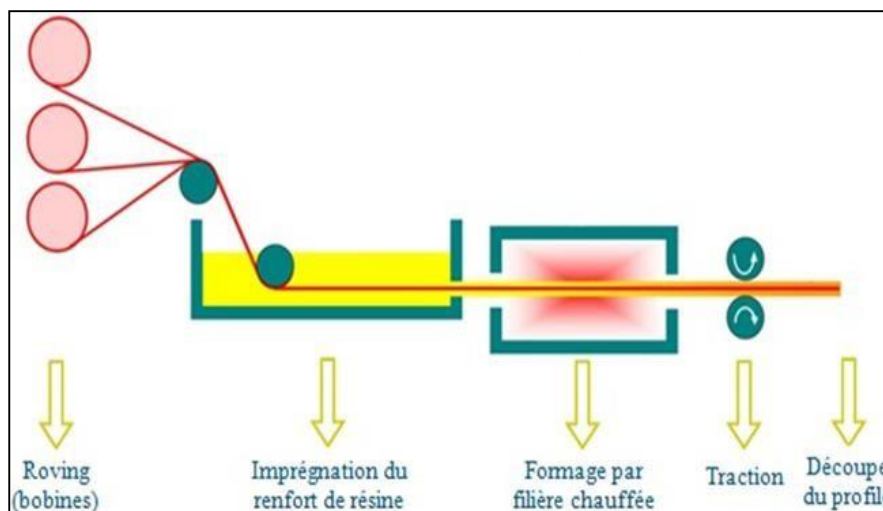


Fig.I. 24 Moulage par pultrusion

I.8.8.Moulage sous vide

❖ Principe

Le moulage sous vide est réalisé en utilisant un moule et un contre-moule rigide, semi-rigide ou souple en fonction de la technique utilisée.

Il est placé à l'intérieur du moule le renfort (mat, tissu, préforme) ; la résine catalysée est versée sur le renfort. La pression exercée sur le moule pendant la mise sous vide est utilisée pour disperser la résine et imprégner le renfort.

❖ Cas d'utilisation

On peut aussi injecter la résine en utilisant une aspiration consécutive au vide.

- Fabrication de petites quantités de pièces avec deux faces lisses.
- ❖ Optimisation des conditions de travail et de sécurité (réduction des émissions de styrène) [22]

❖ Avantage

- ✓ Deux surfaces lisses, éventuellement recouvertes de gelcoat ;
- ✓ Qualité indépendante de la main-d'œuvre ;

- ✓ Qualité constante ;
- ✓ Rapidité de production ;
- ✓ Peu de surface nécessaire ;
- ✓ Investissements très modérés ;
- ✓ Conditions de travail et d'hygiène optimales. [22]



Fig.I. 25 Moulage sous vide.

Références

- [1] Rahul Reddy Nagavally. Composite materials - history, types, fabrication techniques, advantages, and applications. Affiliation: Kakatiya Institute of Technology & Science, Warangal, Telangana, India, 2018.
- [2] Pascal Celle, Marc Marzano, Les matériaux composites, Meudon : ANFA (Association nationale pour la formation automobile), 2014.
- [3] Karbhari. Durability of Composites for Civil Structural Applications. The Institute of Materials, Minerals & Mining. 2007
- [4] Yasmine, Z. (2022). Study and characterization of a cementitious eco-composite incorporating Agave Americana plant fibers.
- [5] Louis Barreur, Bertrand de Maillard, Stanislas Nösperger, Étude prospective stratégique sur les matériaux composites, Rapport final, Paris: la Direction Générale de l'Industrie et des Technologies, 2001-2002.
- [6] Yiki Yang, Jianyong Yu, Helan Xu, Baozhong Sun (editors). Porous Lightweight Composites Reinforced with Fibrous Structures .2017
- [7] Bahlouli Nadia, Cours Matériaux Composites, DESS Mécanique et Stratégie industrielle. 2004. avancée
- [8] Yasmine, Z. (2022). Study and characterization of a cementitious eco-composite incorporating Agave Americana plant fibers.
- [9] JONES 97. Composite materials. Get revising part of the student room Article. 2016.
- [10] Ogin, Brøndsted, and Zangenberg, Composite materials: constituents, architecture, and generic damage, Editor(s): Ramesh Talreja, Janis Varna, 2016.
- [11] Deghboudj Samir. Matériaux Composites. Université l'Arbi Tebessi de Tebessa , faculte de Science et de la Technologie. 2020-2021.
- [12] Herroudj Noura, Étude de L'introduction des fibres d'alfa de tailles différentes dans une matrice polychlorure de vinyle en vue d'améliorer ses propriétés physico- mécanique, Thèse de Magister Université Abderrahmane Mira Bejaïa Faculté de la Technologie, 2010.
- [13] Yasmine, Z. (2022). Study and characterization of a cementitious eco-composite incorporating Agave Americana plant fibers.

- [14] Marianne Le Troedec, Caractérisation des interactions physico-chimiques dans un matériau composite à base de phyllosilicates, de chaux et de fibres cellulosiques, Thèse de doctorat,
- [15] Limoges: Université De Limoges, Ecole Doctorale Sciences-Technologies-Santé, 2009
- [16] Abdellah Houideg, Transfert de charge et frottement Fibre/ Matrice d'un Matériau Composite, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran, Mémoire de Magister, 2012.
- [17] Yasmine, Z. (2022). Study and characterization of a cementitious eco-composite incorporating Agave Americana plant fibers.
- [18] Tahar Masri, Contribution à la modélisation des phénomènes de rupture des matériaux composites, Université Mohamed Khider, Biskra, Mémoire de Magister 2006.
- [19] Jean-Marie Berthelot, Mécanique des Matériaux et Structures Composites, ISMANS Institut Supérieur des Matériaux et Mécanique Avancés, Le Mans ,2010.
- [20] Jean.M.Berthelot, Matériaux composites : Comportement mécanique et analyse des structures, 5eme Ed, Technique Et Documentation, Lavoisier, (2012).
- [21] Yasmine, Z. (2022). Study and characterization of a cementitious eco-composite incorporating Agave Americana plant fibers.
- [22] Bakhouché, H. E., & Encadré par Deghboudj, S. (2020). *Elaboration et Caractérisation Numérique de Biocomposite à Matrice Epoxyde et Renfort Fibres de Sisal* (Doctoral dissertation).

CHAPITRE II

Fibres Naturelles

Chapitre II. Fibres naturelles

II.1 Introduction

L'importance des fibres naturelles, utilisées depuis des centaines d'années pour répondre aux besoins humains tels que l'habillement et le logement, a considérablement diminué grâce à l'utilisation de fibres synthétiques vers la fin des années 1900. Les préoccupations environnementales croissantes et l'épuisement des ressources pétrolières ont encore accru l'importance des fibres naturelles et ont incité les chercheurs et les industries à utiliser des fibres durables au lieu des fibres synthétiques conventionnelles. Outre les propriétés mécaniques et physiques telles que de bonnes valeurs de module spécifique, la faible densité, les propriétés de ténacité considérables des fibres naturelles, le faible coût, la recyclabilité, la non-toxicité et les propriétés d'accessibilité facile sont également des aspects attrayants des fibres naturelles et ces propriétés donnent la possibilité d'utiliser des fibres naturelles. Produits composites renforcés dans diverses industries telles que l'automobile, le bâtiment et l'ameublement. Ce chapitre donne des informations sur la structure et les propriétés des fibres naturelles courantes, qui sont utilisées comme sources de renforcement des fibres [7].

II.1. Fibres naturelles

Les fibres naturelles sont des structures biologiques composées principalement de cellulose, d'hémicelluloses et de lignine. Ils contiennent également des substances extractives, des protéines et certains composés inorganiques en faibles proportions. Les fibres végétales trouvent de nombreuses applications dans l'industrie textile (habillement, ameublement). Compte tenu de leurs propriétés mécaniques spécifiques et de leur caractère renouvelable, ils commencent à trouver des débouchés dans d'autres secteurs industriels (emballage, automobile). Les fibres naturelles sont classées selon leurs origines en :

II.1.1 Fibres minérales

Leur longueur est limitée, sauf pour des types particuliers comme l'amiante, désormais reconnu comme toxiques et nocifs pour la santé humaine (cancérogénicité). Aujourd'hui, il est strictement interdit de l'utiliser de quelque manière que ce soit.

II.1.2 Fibres animales

Ce sont les plus utilisés dans la fabrication de textiles par filature manuelle, comme la laine de mouton et la soie. Toutes les fibres animales n'ont pas les mêmes propriétés, et même au sein d'une même espèce, la fibre n'est pas homogène. Les fibres animales les plus connues sont la soie, la laine et les poils d'animaux (Figure II.1).

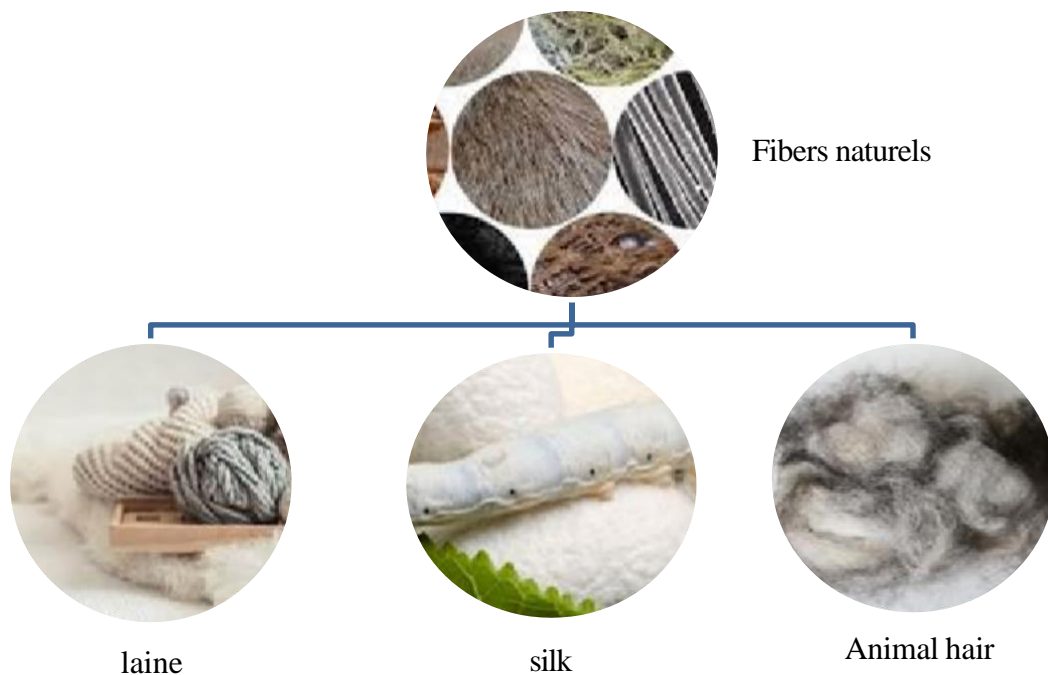


Fig.II.1 Fibres naturels des animaux origines

II.1.3 Fibres végétales :

Les fibres végétales ou fibres végétales sont des matériaux filamenteux issus de la biomasse. Ils peuvent être extraits du fruit, de la tige ou de la feuille d'une plante cultivée, d'arbustes et de graminées. Ils peuvent être filés pour fabriquer des fils et des cordes. Ils sont tissés, tricotés ou tressés pour fabriquer des textiles essentiels à la société. Les fibres végétales présentent une variabilité très importante selon leur origine. En effet, les dimensions des filaments végétaux dépendent de l'état de maturité et également des conditions environnementales de croissance de la plante. La variabilité du diamètre peut être très importante le long d'une même fibre végétale [4]. Les fibres végétales sont également caractérisées par la diversité d'épaisseur de leur paroi cellulaire résultant de la porosité fibreuse [5]. La forme morphologique de la fibre végétale peut

également être un facteur important dans la compréhension du transfert de contraintes aux interfaces fibre-matrice[6] .

II.1.4 Introduction aux fibres végétales:

Les fibres végétales ou fibres végétales sont des matériaux filamentaires dérivés de la biomasse. Ils peuvent être extraits du fruit, de la tige ou de la feuille d'une plante cultivée, des arbustes et des graminées. Ils peuvent être filés pour fabriquer des fils Ils sont tissés, tricotés ou tressés pour rendre les textiles essentiels à la société. La fibre végétale présente une variabilité très importante selon leur origine. En effet, les dimensions du légume Les filaments dépendent de l'état de maturité et aussi des conditions environnementales de croissance du La variabilité du diamètre peut être très importante le long de la même fibre végétale [2]. Fibres végétales se caractérisent également par la diversité de l'épaisseur de leur paroi cellulaire résultant de la porosité fibreuse [3]. La forme morphologique de la fibre végétale peut également être un facteur important dans comprendre le transfert de contraintes aux interfaces fibre-matrice [4].

II.1.4.1 Classification des fibres végétales

Les fibres naturelles sont classées en trois catégories. Ce sont des fibres végétales, des fibres animales et fibres minérales ([Figure II.2](#)). Les fibres végétales sont généralement constituées principalement de cellulose, d'hémicellulose, lignine, pectine. Les principales fibres naturelles sont le coton, le jute, le lin, la ramie, le sisal et le chanvre. Cellulose les fibres sont principalement utilisées dans la fabrication du papier et du tissu. Cette fibre est classée en graine fibres, fibres de feuilles, fibres libériennes / fibres de tige, fibres de fruits [4].

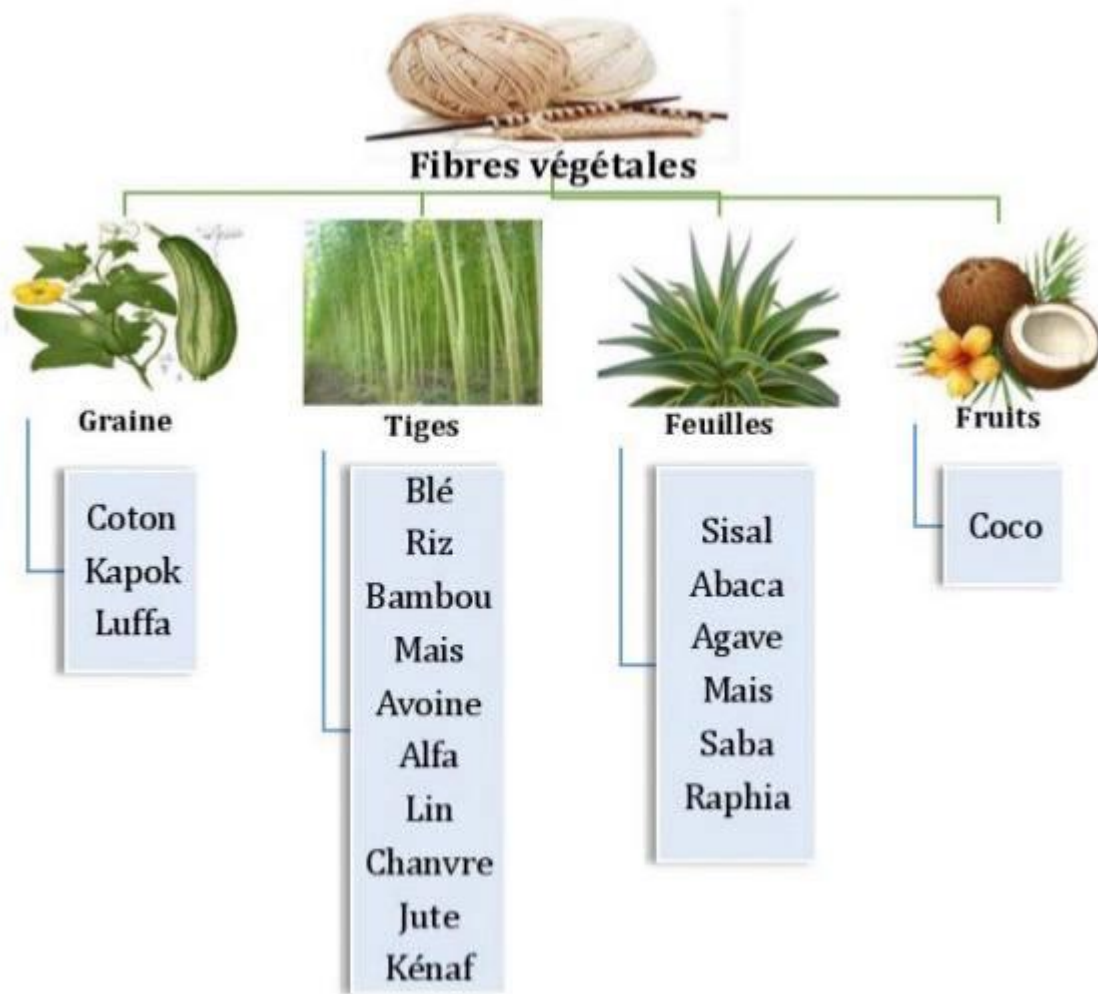


Fig.II.2 Classification des fibres végétales [4].

II.1.4.2 Utilité de l'utilisation des fibres

Les fibres végétales présentent de nombreux avantages dans la formulation des matériaux, outre leur capacité à stocker le dioxyde de carbone et leurs [7] :

- Caractère renouvelable grâce à sa production annuelle
- Bon marché
- Biodégradabilité
- Ressource renouvelable
- Nécessite peu d'énergie pour produire
- Bonne isolation thermique et électrique
- Propriétés mécaniques spécifiques importantes (résistance et rigidité).

Fibres de sisal : Ses fibres très résistantes sont extraites des feuilles de la plante de sisal (agavesisalana) constituée par une rosette de grandes feuilles dont chacune peut contenir de 1000 à 1200 paquets de fibres à section triangulaire allant jusqu'à 2m de longueur. Cette plante est originaire de l'est du Mexique. Les méthodes de traitement pour l'extraction des fibres de sisal sont : rouissage, déflexion et laminage. Cette fibre sert à la fabrication de cordage, de tissus grossiers et de tapis. On l'utilise aussi pour fabriquer des disques de polissage [8].



Fig.II.3 Sisal

Palmier : Le palmier dattier est typiquement cultivé dans les oasis sahariennes. Il existe plus de 2600 espèces de palmiers. Son hauteur varie de 20 à 30m, avec un tronc cylindrique (le stipe), portant une couronne de feuilles (les palmes) qui sont divisées avec une longueur de 4 à 7m. Les feuilles âgées peuvent rester plusieurs années avant de tomber. Les palmes sont récoltées à la main en fin de maturité, dans la même saison, et séparées des rachis. La fibre peut être extraite des différentes parties du palmier [6], [7].



Fig.II.4 Palmier

Jute : Le jute (Fig.2.8) est produit à partir de plantes du genre *Corchorus*, qui comprend environ 100 espèces. C'est l'une des fibres naturelles les moins chères et c'est actuellement la fibre libérienne dont le volume de production est le plus élevé. Le Bangladesh, l'Inde et la Chine offrent les meilleures conditions pour la culture du jute [6].



Fig.II.5 Jute

Le coton : Fibre naturelle d'origine végétale (Figure II., c'est la plante la plus utilisée dans le monde (50%). Les fibres de coton sont caractérisées par une bonne résistance avec une élasticité médiocre à cause du fort degré de cristallinité du micro fibrilles de la cellulose. Elles sont caractérisées par une grande légèreté qui permet de confectionner des textiles doux et confortables avec un coût raisonnable et faible [9]



Fig.II.6 Coton

Alfa : Alfa (de Halfa arabe) est une plante herbacée vivace de la famille des Graminacées, originaire des régions arides du bassin méditerranéen occidental. Les principaux centres d'intérêt sont les grands plateaux algérien-marocain, et au-delà, il s'étend à l'ouest du Maroc, au sud du Portugal, à l'est et au sud de l'Espagne. Alfa se trouve dans les zones les plus sèches de la région méditerranéenne. Dans le sud, sa limite naturelle est déterminée par la sécheresse. Au nord et à l'ouest, c'est l'humidité croissante du climat qui élimine la flore[9] . Alfa a été utilisé pour fabriquer des tapis, des rideaux, des tapis, des paniers, des plateaux, des chaussures, des ficelles et diverses cravates. À la fin du 19 siècle et au début du 20 siècle, Le papier Alfa est apparu comme un papier de qualité qui donnerait une grande importance économique à cette plante[10] . L'usine Alfa est composée d'environ 50 à 54% de cellulose, 27 à 32% d'hémicellulose, 17 à 19% de lignine, 0,5% de cire et 2% de cendres. La plante est cylindrique, environ 1 m de long. Sa structure est formée par plusieurs faisceaux de filaments, approximativement circulaires, alignés le long de la plante[11] .



Fig.II. 7 Fibre Alfa

II.2. Morphologies des fibres végétales

II.2.1. Structure d'une fibre végétale

La fibre végétale est un composite en soi. Le renfort est constitué par les couches de micro fibrilles cellulosiques en partie cristallines. Ce dernier est revêtu d'une matrice de polysaccharides amorphes (hémicellulose et pectine) qui est associée par liaison hydrogène et covalente à la lignine. La fibre végétale est composée de plusieurs parois parallèles à l'axe de la fibre et disposée en couches superposées dans le sens radial. Ces différentes couches forment la lamelle moyenne, la paroi primaire et la paroi secondaire. Ce dernier borde une lumière de diamètre variable selon les espèces. La paroi secondaire est composée de trois couches de micro-fibrilles (S1, S2 et S3) (Figure II.8) [12].

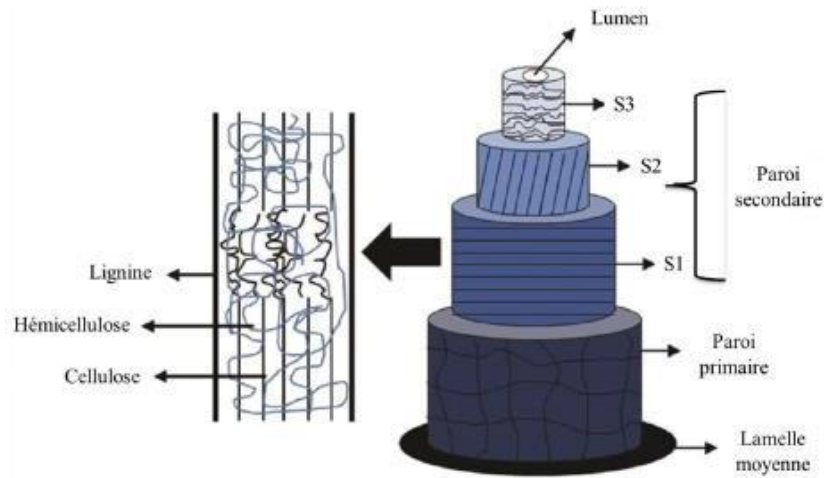


Fig.II. 8 Représentation schématique de la paroi cellulaire[13]

Dans une fibre végétale, les propriétés physiques sont principalement déterminées par la composition chimique et physique, la structure, le pourcentage de cellulose, l'angle micro-fibrillaire, la section et le degré de polymérisation.

II.2.2. Composition chimique des fibres végétales

La biomasse végétale est composée de plusieurs macromolécules étroitement liées entre elles dans la paroi végétale. Comme nous l'avons vu précédemment, les composés les plus importants sont la cellulose, l'hémicellulose, les pectines et les lignines. Ces différents constituants sont disposés de manière très complexe. Dans le bois, la cellulose est concentrée à l'intérieur de la fibre (Figure II.9). Les parois extérieures de la fibre sont composées principalement de lignines et d'hémicelluloses et les lamelles de jonction inter-fibres sont composées presque entièrement de lignine. Un réseau supplémentaire de pectines (polymères polysaccharides acides) augmente la complexité de la matrice. Le réseau de polysaccharides peut également être solidifié par un réseau secondaire de HRGP (Hydroxy proline Riche Glycol Protéines) [14].

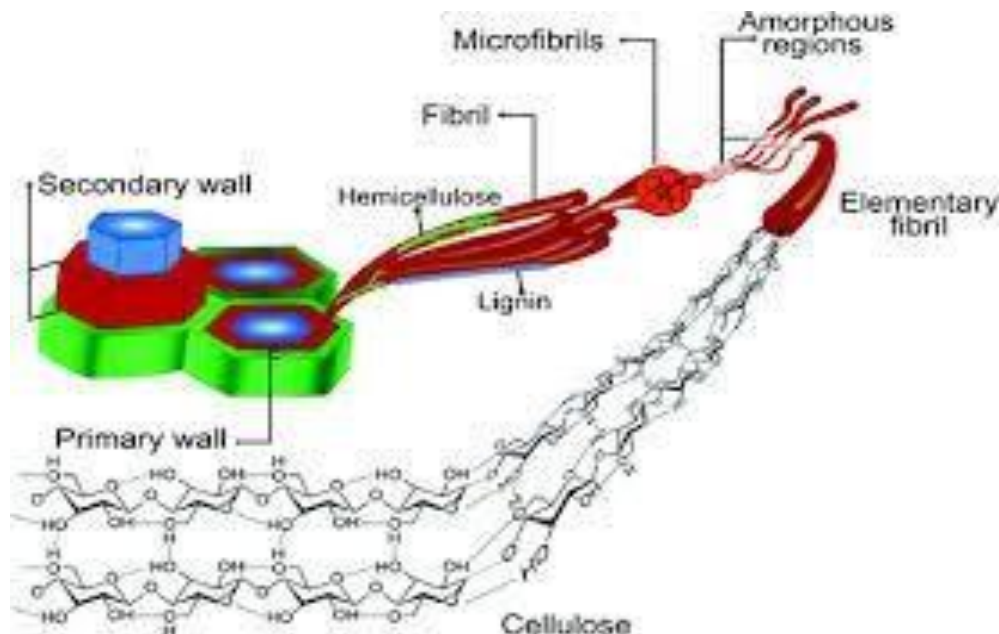


Fig.II. 9 Composition chimique d'une fibre végétale.

II.2.2.1. Cellulose

Cellulose L'existence de la cellulose comme matériau commun dans les parois cellulaires des plantes a été découverte par Anselme Payen en 1838[15] . La cellulose représente la molécule biologique la plus abondante sur terre. D'un point de vue chimique, la cellulose est une macromolécule constituée d'une très longue chaîne stéréo-régulière de liaisons de glucose $C_6H_{12}O_6$ (Figure II.10). La cellulose a une structure fibrillaire et partiellement cristalline. Les micro-fibrilles de cellulose sont constituées de zones cristallines ordonnées et de zones amorphes totalement désordonnées. Dans la zone cristalline, les chaînes de cellulose sont disposées parallèlement les unes aux autres, liées les unes aux autres, liées par des liaisons hydrogène intra et intermoléculaires. Toutes les propriétés de la cellulose sont étroitement liées à la haute densité des liaisons hydrogène qui se développent entre les chaînes. Les interactions moléculaires sont fortes et assurent la cohésion nécessaire tout en empêchant la pénétration des réactifs. Grâce à sa cohésion, la cellulose est insoluble dans la plupart des solvants. La cellulose est de nature très hydrophile.

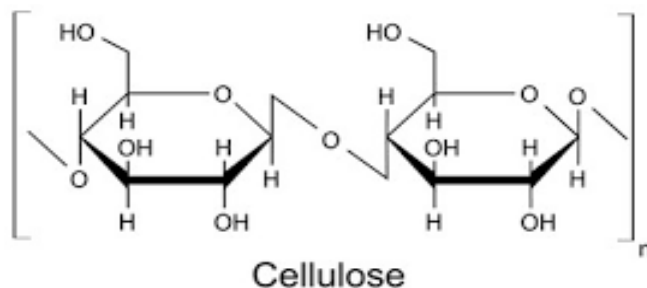


Fig.II. 10 Structure chimique de la cellulose

II.2.2.2. Hémicelluloses

Dans la plupart des fibres naturelles, la cellulose est mélangée à des hémicelluloses qui sont également des polysaccharides composés d'une combinaison de 5 et 6 anneaux de carbone (Figure II.11). L'hémicellulose forme la matrice de support des micros fibrilles de cellulose. L'hémicellulose diffère de la cellulose sous trois aspects. Premièrement, il est composé de sucres neutres : xylose, arabinose, galactose, glucose, mannose et acides uroniques alors que la cellulose ne contient que 1, 4- β D-glucopyranose. Deuxièmement, il a un degré considérable de ramification contenant des groupes latéraux qui explique sa nature non cristalline. Enfin, dans son état naturel, il a un degré de polymérisation entre 50 et 300, tandis que celui de la cellulose indigène est 10 à 100 fois plus élevé. L'hémicellulose est très hydrophile, soluble en milieu alcalin et facilement hydrolysé en acides[16] -[17].

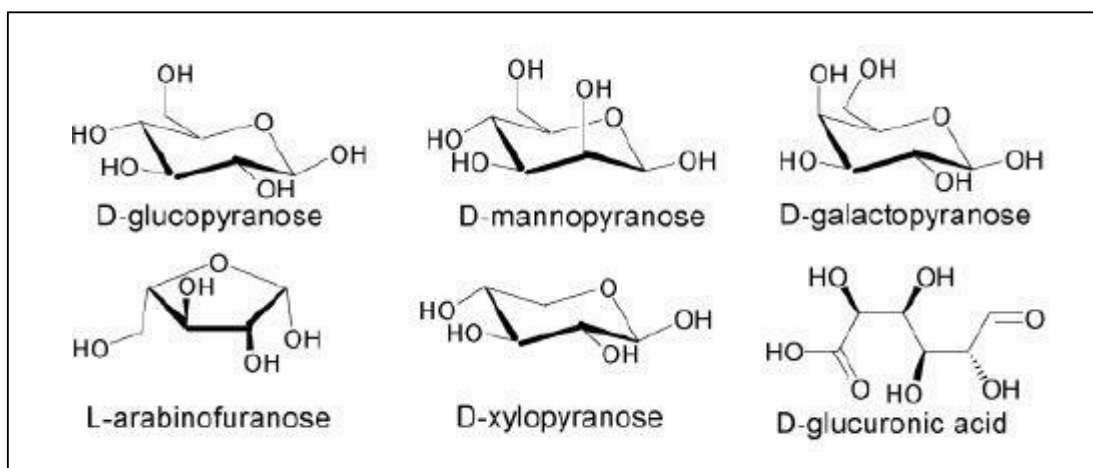


Fig.II. 11 Différentes Structure chimique des hémicelluloses

II.2.2.3. Lignine :

La lignine est une macromolécule extrêmement hétérogène composée de polymères aromatiques. Il représente, après les polysaccharides, le polymère naturel le plus abondant sur terre. Il participe à la rigidité structurelle des parois cellulaires et protège les plantes contre l'attaque des organismes pathogènes. La lignine est une molécule tridimensionnelle composée d'unités phénylpropane (Figure II.12). Les unités primaires (monolignols) constituant la lignine sont l'alcool coniférique, l'alcool sinapylique et l'alcool pcoumaryl. Pendant le processus de lignification, les phénoloxyls végétales telles que les laccases interviennent et permettent la polymérisation des différentes unités élémentaires. Une fois synthétisée, la lignine s'associe aux différents polysaccharides pour former une matrice constitutive de la paroi végétale [17]-[16]. La lignine est complètement amorphe et hydrophobe. Il n'est pas hydrolysé par des acides, mais soluble dans la soude lorsqu'il est chauffé, facilement oxydé et facilement condensé avec du phénol [16].

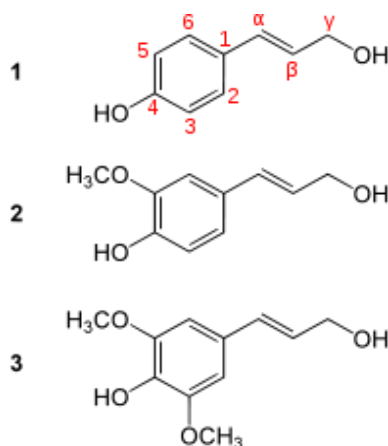


Fig.II. 12 Structure de la lignine

II.2.2.4. Pectines

Les pectines (Figure II.13) jouent un rôle clé dans l'architecture du mur végétal. Structurellement, les pectines sont une famille de polysaccharides complexes qui contiennent une chaîne d'unités d'acide α -D-galacturonique reliées entre elles par des liaisons α (1-4), interrompues par la présence d'unités de L-rhamnopyranose. Les pectines portent également des substituants non gazeux, principalement du méthanol, de l'acide acétique, de l'acide phénolique et parfois des groupes amides. L'estérification des résidus d'acide galacturonique avec du méthanol ou de l'acide acétique est une caractéristique qui joue un rôle très important dans les propriétés physico-chimiques des pectines, en particulier dans la formation de gel [8].

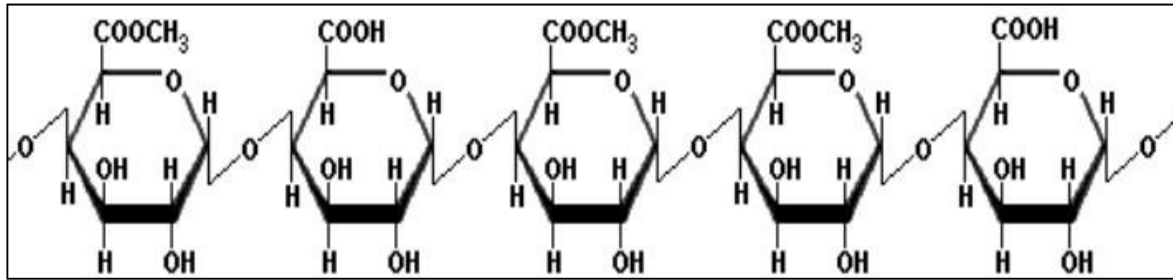


Fig.II. 13 Structure moléculaire de la pectine

II.2.2.5. Cires

Les cires sont des constituants de fibres naturelles qui peuvent être extraites avec des solutions organiques. Ces matériaux se composent de différents types d'alcools insolubles dans l'eau et de plusieurs acides tels que l'acide palmitique, l'acide oléagineux et l'acide stéarique [18].

II.2.2.6. Protéines

De nombreuses études existent sur les protéines de la paroi, compte tenu de leur forme complexe et de leur rôle encore inconnu dans la paroi. Cependant, ils sont classés en quatre classes selon leur composition en acides aminés et de leur schéma de glycosylation :

- Protéines riches en hydroxy proline (HRGP),
- Protéines riches en glycine (GRP),
- Protéines riches en proline (PRP) et les arabinogalactan
- Protéines (AGP) (Girault et al. 2000)

Tableau II. 1 Composition chimique de quelques fibres végétales [22]-[20].

Fibres	Cellulose (%)	Hémicellulose (%)	Pectine (%)	Lignine (%)
Genêt d'Espagne	44,5	16,3	13,3	18,5
Jute	70	14	2	18
Cotton	93	3	3	1
Lin	71	19	1	2
Ramie	75	15	2	1
Sisal	73	13	1	7
Alfa	45	24	-	24

II.3. Propriétés mécaniques, physiques et chimiques des fibres végétales

II.3.1.1. Propriétés mécaniques

Les fibres végétales présentent globalement de bonnes performances mécaniques. Pour les plus performantes fibres végétales, le module de Young en traction peut atteindre les 70 GPa, soit l'équivalent en rigidité de la fibre de verre E, pour une densité deux fois moindre (matériau ligno-cellulosique 1.5g/cm³, fibre de verre 2.6 g/cm³), ce qui permet de les utiliser efficacement tant que renfort pour des composites dont la résistance spécifique (résistance rapportée à la densité) sera plus élevée (**Tableau II.2**) [19].

Tableau II. 2 Propriétés mécaniques des fibres naturelles les plus courantes [18]

Type defibre	Ténacité à sec (cN/tex)	Ténacitéau mouillé (cN/tex)	Contrainte de rupture (MPa)	Module d'élasticité (GPa)	Élongation de rupture (%)	Densité (g/cm ³)	Angle de fibrillation (°)
Chanvre	–	–	310-1110 (700)	3-90	1.3-6.0 (3)	1.4-1.6	2-6
Lin	20 à 33	29 à 33	343-1500 (700)	8-100	1.2-4.0	1.4-1.5	5-10
Jute	26 à 35	28 à 48	187-800 (500)	3-90 (65)	1.3-6.0 (3)	1.3-1.5	7-10
Ramie	59	66	290-1060 (800)	5-128 (65)	0.2-6.0 (3)	1.5-1.5	7-12
Kénafe	–	–	180-1191 (700)	22-128 (55)	1.6-6.9 (3)	1.2-1.4	–
Noix decoco	–	–	95-270 (200)	2.8-6 (5)	15.0-51.4 (30)	1.15-1.5	30-49
Sisal	–	–	80-855 (600)	9-38 (12)	1.9-14.0 (3)	1.0-1.5	10-25
Abaca	–	–	12-980 (600)	12-72 (50)	1.0-12.0 (4)	1.4-1.5	–

II.3.1.2. Propriétés physiques

Les fibres végétales de qualité présentent de grands intérêts dans de nombreux domaines d'application. Même si leurs propriétés font qu'elles ne peuvent pas concurrencer certaines fibres synthétiques pour des utilisations spécifiques, dans de larges domaines, elles peuvent être employées avec succès, voire même avec un gain de performance [19]. Les propriétés mécaniques des fibres cellulosiques dépendent également des propriétés physiques de ces fibres telles que le diamètre de la fibre, la longueur, la densité, le gain d'humidité et l'angle demicro fibrille. Certains éléments physiques importants doivent être connus sur chaque fibre végétale avant qu'elle soit utilisée pour atteindre le potentiel maximal, tel que la forme, taille, l'angle fibrillaire, épaisseur des parois cellulaires, le taux de cristallinité[3].

Tableau II. 3 Propriétés physiques des fibres naturelles [20]

Fibre	Contrainte à la rupture (MPa)	Module d'élastique (GPa)	Déformation (%)	Densité
Chanvre	350-800	30-60	1.6-4.0	1.48
Lin	500-900	50-70	1.5-4.0	1.45
Jute	300-700	20-50	1.2-3.0	1.3
Bambou	500-740	30-50	~2	1.4
KénaF	400-700	25-50	1.7-2.1	1.3
Noix de coco	150-180	4-6	20-40	1.2
Sisal	300-500	10-30	2-5	1.5

II.4. Méthodes d'extraction des fibres végétales

Les techniques d'extraction des fibres végétales ont un effet significatif sur la qualité et les performances des fibres obtenues. Ces techniques peuvent être effectuées par des différentes procédures tel que : méthodes chimiques à la soude, Kraft, bisulfite, acide, Soude-Anthraquinone, sulfate neutre de sodium) [23], mécaniques (décortication, teillage, peignage) et biologiques (rouissage à l'eau, à terre, et le rouissage enzymatique...). En revanche, certains chercheurs ont également recouru à combiner entre deux ou plusieurs procédés afin d'améliorer la qualité de la fibre finale. Toutes les techniques d'extractions précédentes ont un objectif commun : obtenir des fibres longues, non endommagées avec de bonnes

propriétés mécaniques à travers l'élimination des composants non cellulosiques, notamment, ceux qui composent la lamelle mitoyenne, qui à son tour joue le rôle de maintien de la cohésion des cellules fibreuses. Le choix de la technique d'extraction dépend de plusieurs facteurs dont les principaux sont : i) la partie où se trouvent les fibres (feuilles, tiges, racines, fruits...), ii) l'orientation des fibres dans leur emplacement original : en particulier, des fibres alignées parallèlement (*Zostera marina*, Kenaf, *Stipa tenacissima*, *Lygeum spartum*) et des fibres distribuées aléatoirement (*Luffa*, *Cactus*, écorce de Palmier (40)), (Figure II.14) [17].



Fig.II. 14 Représentation de la distribution des fibres :(a) distribution aléatoire (b) distribution parallèle

II.4.1. Extraction mécanique

Les méthodes mécaniques d'extraction des fibres végétales sont des procédés permettant de séparer les faisceaux de fibres qui se trouvent dans la plante. Parmi ces techniques mécaniques, on distingue la technique manuelle, le décorticage, le laminage ou le pressage (Figure II.15.a), teillage, déflexion, explosion à la vapeur...etc.

Dans la technique « décortication mécanique » des fibres libériennes, on utilise des machines basées soit sur le principe des moulins broyeurs, soit sur le principe des rouleaux concasseurs rotatifs, profilés [9]. La décortication mécanique représente un procédé simple et rapide de qualité supérieure [51] qui respecte l'environnement au contraire des procédés chimiques [52]. Elle exige cependant une grande consommation de l'énergie électrique [53], et produit des fibres courtes [54]. Toutefois, dans certains pays émergents, à cause du coût des salaires effectives, les fibres de kenaf sont plutôt séparées manuellement

que mécaniquement [51]. (Figure II.15.b) présente une machine de décortication utilisée pour extraire les fibres de canne à sucre.



Fig.II. 15 Différente machines : (a) machine de laminage ; (b) machine de décortication

II.4.1.1. Teillage

Cette méthode consiste à séparer les fibres (tiges) par une action mécanique telle que le broyage et le battage. Cette technique est plutôt utilisée pour extraire les fibres de lin ou de chanvre. Elle est réalisée par des machines automatisées qui engagent, maintiennent et libèrent automatiquement les tiges grâce à des systèmes de roues cannelées à grandes dents au début puis à dents plus fines. Ensuite, les fibres passent sous la rainure des rouleaux avec un angle proche de 90° pour rendre le broyage plus efficace. L'opération s'effectue successivement du côté pied et du côté tête. Les fibres courtes, également appelées étoupes, moins résistantes, et les anas sont récupérés par aspiration et séparés [18].

II.4.1.2. Déviation

L'extraction des fibres se fait par une action combinée de grattage et de battage. Les machines appelées « raspadors » (grattoir en espagnol) râpent les feuilles de la plante et libèrent les fibres. Ces machines sont principalement constituées d'un arbre rotatif entraîné par un moteur, sur lequel sont fixés des supports supportant des batteurs en acier. Les tiges introduites devant la machine sont prises entre ces batteurs et une table à ciseaux, râpées et guidées vers le côté opposé. La poudre et le bois passent à travers des tamis. La distance entre les lames est réglable en fonction du lot [18].

II.4.1.3. Roulage

Les tiges sont coupées en morceaux qui sont ensuite écrasés sous une presse ou par roulage ou par une combinaison des 2 traitements. Cette opération est effectuée plusieurs fois de suite jusqu'à ce que les fibres soient suffisamment séparées [18].

II.4.2. Extraction chimique

Elles permettent d'éviter les inconvénients de l'extraction mécanique, et surtout un gain considérable de temps et d'énergie. Dans cette section, nous présentons les principales méthodes d'extraction chimique des fibres végétales.

II.4.2.1. Procédé Kraft

Ce procédé alcalin vise à éliminer la lignine, les pectines et les hémicelluloses sous l'action d'une solution d'hydroxyde de sodium (NaOH) et de sulfure de sodium (Na₂S). Ce dernier est un agent réducteur ; il protège la cellulose et évite son oxydation. La température de cuisson est comprise entre 170° et 175°C pour une durée de 2 à 4 heures [18].

II.4.2.2. Procédé au bisulfite

Ce procédé permet de séparer la lignine des fibres de cellulose à l'aide de différents sels d'acide sulfureux. Les sels utilisés dans le processus de réduction sont, en fonction du pH : les sulfites (SO₃²⁻) ou les bisulfites (HSO₃⁻). Elle est basée sur la réaction sur la lignine du sulfite d'hydrogène de calcium, de sodium et d'ammonium ou de magnésium contenant du dioxyde de soufre libre. Le pH est compris entre 1,5 et 5 (sulfites ou bisulfites), la durée est comprise entre 4 et 14 heures et la température entre 1 et 2 heures entre 4 et 14 heures et la température de 130° à 160°C qui dépend également de la base utilisée [18].

II.4.2.3. Procédé acide

Les composants non cellulosiques sont éliminés par l'action d'un acide de préférence fort (acide sulfurique). L'acide transforme la lignine en acide lignosulfonique soluble, ou acide chlorhydrique, qui forme des chlorolignines solubles dans l'hydroxyde de sodium grâce à ses ions chlorate.

II.4.2.4. Procédé à l'hydroxyde de sodium

Ce procédé utilise uniquement la soude NaOH pour dissoudre les substances non cellulosiques telles que la lignine, la pectine et l'hémicellulose, ainsi que les différents constituants formant la réserve et la paroi externe de la tige végétale. La température, la pression, la concentration et la durée du traitement sont à définir en fonction du lot, de l'âge et du type de la plante afin de ne pas dégrader les fibres de cellulose. Il est conseillé de contrôler le pH de la solution et de l'ajuster autour de 7. Des réducteurs peuvent être ajoutés pour éviter l'oxydation de la cellulose [18].

II.4.3. Extraction biologique

II.4.3.1. Rouissage

Le processus de rouissage utilisé pour l'extraction des fibres longues résulte de la séparation des amas de fibres des autres types de cellules non fibreuses par la digestion des cellules vivantes par les micro-organismes. Le rouissage consiste à dégrader les composés hydrosolubles de la paroi cellulaire [19]. Il existe de nombreux processus de rouissage, à savoir

II.4.3.2. Rouissage à terre

Le rouissage est un processus naturel destiné à favoriser l'extraction des fibres. Il consiste à étaler les tiges (de lin par exemple) dans un champ après sa récolte, afin de bénéficier de l'action combinée du soleil et de la pluie favorisant le développement de micro-organismes capables de séparer les éléments non cellulodiques de la partie fibreuse de la plante. Cette opération peut durer de 6 à 8 semaines selon les conditions météorologiques. Malgré l'efficacité de cette méthode, elle connaît plusieurs inconvénients qui résident dans son entière dépendance des conditions météorologiques (excès d'humidité, vent très fort). Le rouissage à l'air est donc un procédé efficace si les conditions météorologiques sont bonnes mais il reste très lent, c'est donc un procédé aléatoire [18].



Fig.II. 16 Rouissage à terre

II.4.3.3. Rouissage à l'eau

Ce type de rouissage est basé sur le même principe de développement de micro-organismes que le rouissage à l'air, à la différence que les tiges (de chanvre par exemple) sont immergées dans l'eau pendant plusieurs jours. Les bottes de 5 à 7 kg sont soumises à l'action de bactéries anaérobies. Dès que les fibres se détachent sur toute la longueur, la plante est sortie de l'eau pour être séchée. Cette technique donne des résultats moins aléatoires que la première mais elle présente un inconvénient majeur : la pollution de l'eau. En effet, le

rouissage du lin et du chanvre est très répandu dans le nord de l'Europe (France, Belgique, Pays-Bas). Le rouissage à l'eau s'effectue alors en cuve, dans de l'eau (37°C) jusqu'à ce que les fibres soient délignifiées et non collantes. Cette technique est en régression continue, au profit du rouissage à terre [18].



Fig.II. 17 Rouissage à l'eau

II.4.3.4. 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. Dans la première catégorie de bactéries, il existe trois espèces, l'une avec une activité dépolymérisant et l'autre avec une activité glycosides capable d'hydrolyser la chaîne principale et de couper les chaînes latérales en utilisant les oligosaccharides libérés. La deuxième n'a qu'une activité dépolymérisant mais est incapable d'utiliser les produits d'hydrolyse des hémicelluloses. Enfin, la troisième possède une activité glycosurique mais pas d'activité dépolymérisant [18].

II.5. Application des fibres végétales

Les matériaux composites renforcés par des fibres naturelles sont actuellement en cours de développement pour remplacer les matériaux traditionnels les principaux marchés sont représentés comme suit :

Tableau II. 4 Domaines d'application des fibres végétales [12].

Principaux marchés	Domaines d'application des fibres végétales
Automobile	Les entreprises comme Opel Audi, BMW, Renault, Ford, Se fabriquent des composites renforcés de fibres végétales : garnitures panneaux de portes, planches arrière, revêtements intérieurs et pass de roues, voûte interne de pneu, pare-chocs, tableau de bord, etc...
Construction	Les fibres végétales sont utilisées en renfort de matériaux, notamment d'isolation, de produits en ciment, profilés de portes, fenêtre, panneaux décoratifs, etc...
Infrastructure	Trottoirs, digues, signalisation routières, isolant phoniques, etc...
Autres applications	Les palettes, le mobilier (table de camping ou chaise), équipement de jeux publics, etc...

II.6. Analyse de l'accessibilité des fibres végétales

II.6.1. Disponibilité mondiale des fibres végétales

En accord avec la politique mondiale de préservation de la nature, l'utilisation de ressources naturelles renouvelables est de plus en plus encouragée dans différents secteurs, tels que l'industrie automobile et la construction...

Figure 1.9 montre que l'Inde, la Chine et l et le Brésil sont les principaux producteurs de fibres naturelles.

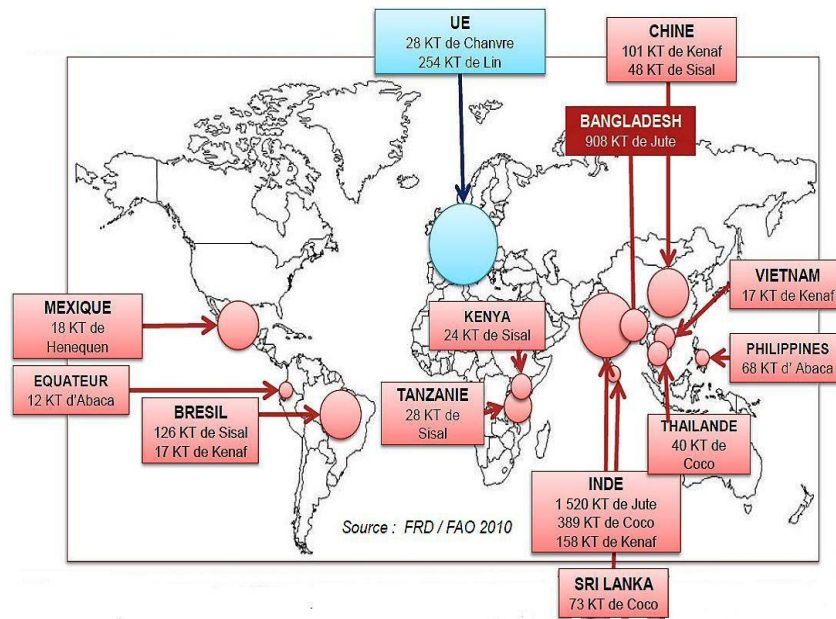


Fig.II. 18 Gisement mondial de fibres végétales hors coton et bois (2001-2008)[21] .

II.6.2. Fibres végétales sont disponibles en Algérie

Avec ses montagnes, ses hauts plateaux et son Sahara luxueux, l'Algérie possède des ressources végétales inépuisables, notamment le liège, l'alfa, le dis, l'agave americana, le doum, le palmier dattier, le pin, le coton, le lin, etc. Grâce à sa production annuelle de 6000 tonnes de liège de prés, l'Algérie se distingue. Inscrite à la sixième place mondiale. Environ 4 millions d'hectares sont occupés par l'Alfa. Il convient également de souligner que l'Algérie compte plus de 10 millions de palmiers dattiers. Par ailleurs, l'Algérie possède de nombreux végétaux tels que le Diss et le Doum... qui demeurent aujourd'hui inexploités [21].

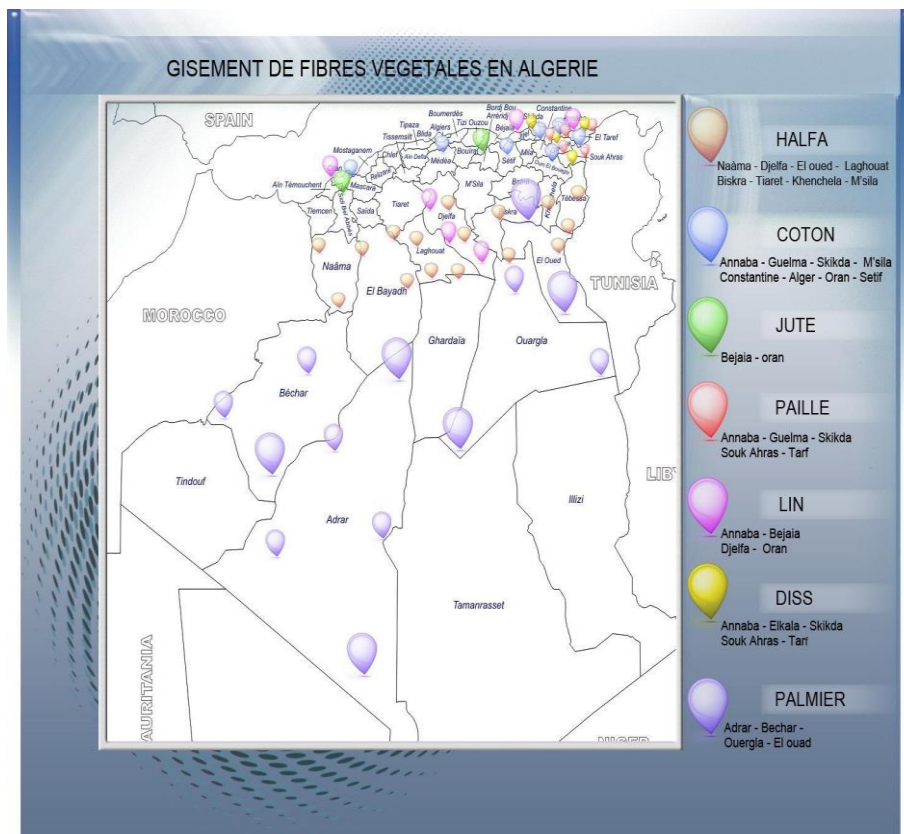


Fig.II. 19 Gisement de fibres végétales en Algérie [22].

II.7. Importance de l'emploi des fibres naturelles

L'encouragement à l'échelle mondiale de l'utilisation des fibres naturelles en tant que source de renforcement dans les matériaux composites favorise la mise en valeur des sous-produits agricoles tout en préservant le développement durable. Effectivement, cette méthode présente de nombreuses opportunités, en particulier pour les pays les moins industrialisés, tout en minimisant l'impact environnemental [22].

Avantages des utilisations des fibres naturelles dans les applications composites : L'utilisation du produit à base de pétrole a un impact négatif sur l'environnement, c'est pourquoi les chercheurs se sont concentrés sur les fibres naturelles pour trouver des solutions qui permettent leur utilisation dans l'industrie sans risque pour l'environnement. Les fibres naturelles ont été classées comme des matériaux respectueux de l'environnement, qui contiennent de bonnes propriétés par rapport aux fibres synthétiques. La performance des composites dépend de nombreux facteurs tels que la structure, les propriétés physiques, la composition chimique, l'angle micro-fibrillaire, les dimensions des cellules, etc. Dans sa définition la plus simple, les fibres naturelles proviennent de plantes ou d'animaux ce qui signifie qu'elles ne sont pas synthétiques ou artificielles, il existe de nombreuses variétés de sources de fibres :

- Fibres de graines : coton, noix de coco, kapok
- Fibres baste : Jute, lin, chanvre, kenaf, bambou
- Fibres d'herbe et de roseau : riz, maïs, blé
- Fibres de feuilles : sisal, alfa, ananas, banane, abaca, palmier

En fonction des propriétés souhaitées des fibres naturelles, il est important de tenir compte des différences lors du choix d'un type de fibre par rapport à un autre.

Tableau II. 5 Avantages et inconvénients des fibres végétales comme renfort de matériaux composites[23]

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> -De bonnes propriétés mécaniques spécifiques (résistance et rigidité). Généralement, proches de celles des fibres de verre (module d'Young) ; -un recyclage facile (combustion) ; -Faible coût ; -Neutre pour l'émission de CO₂ ; -Ressource renouvelable ; -Demande peu d'énergie pour être produite ; -Bonne isolation thermique et acoustique ; -Pas d'irritation cutanée lors de la manipulation des fibres ; -Pas de résidus après incinération ; -Non abrasif pour les outillages ; 	<ul style="list-style-type: none"> -une méthode de mise en œuvre difficilement reproductible (non industrielle) ; -des propriétés physiques non reproductibles ; -la quantité et la qualité des fibres dépendent de l'environnement et de l'humidité ; -une reprise en eau importante : 8 ou 10 % du taux d'humidité ; -une calibration difficile ; -Fibres anisotropes ; -Renfort discontinu ; -Pour des applications industrielles, demande la gestion d'un stock ;

Malgré les avantages cités précédemment, les fibres végétales présentent aussi plusieurs caractères non désirables : mouillabilité faible, incompatibilité avec quelques matrices polymères et absorption d'humidité importante. Ces inconvénients peuvent être améliorés par des traitements physiques ou par traitements chimiques.

II.8. Statistiques sur les fibres naturelles :

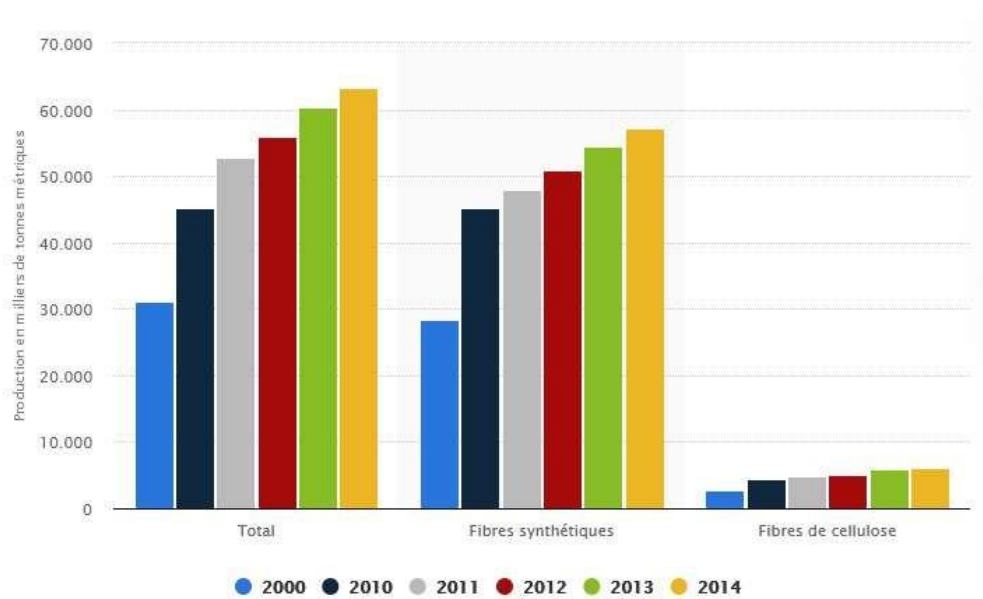


Fig.II. 20 Fibres chimiques - production mondiale 2000-2014 Publié par Statista Research Ministère, 28 juillet 2015 [24].

Cette statistique montre l'efficacité de production globale de l'industrie des fibres synthétiques par type de fibre en 2000, 2010, 2011, 2012, 2013 et 2014. En 2000, environ 28,4 millions de tonnes de fibres synthétiques ont été produites dans le monde.

Références

- [1] Ilcyszyn, F. (2013). Caractérisation expérimentale et numérique du comportement mécanique des agro-composites renforcés par des fibres de chanvre (Doctoral dissertation, Université de Technologie de Troyes)
- [2] Faruk. O, Bledzki. A. K, Fink H. P, Sain. M « Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000–2010 » Volume 37, Numéro 11, Pages 1552-1596 (2012).
- [3] Bledzki. A. K, Faruk. O, Sperber. V. E, “Cars from biofibers”, *Macromolecular Materials and Engineering*, 291, pages 449- 457, (2006). »
- [4] Guittat.Y “ PSA (Peugeot-Citroën) et les matériaux verts” article publié sur (<http://www.automobile-entreprise.com/PSA-Peugeot-Citroen-et-les,1090>), le 16 octobre (2009). »
- [5] Elfordy. S, Lucas. F, Tancret. F, Scudeller. Y, Goudet. L, “Mechanical and thermal properties of lime and hemp concrete manufactured by a projection process” *Construction and Building Materials*, Pages 2116–2123 (2008). ».
- [6] Gay. D « *Matériaux composites* », *Livre 5eme Edition, Hermes Science Publications, (2005)*.
- [7] Charlet, Morvan, Bréard, Jernot, and Gomina, *Etude morphologique d’un composite naturel. La fibre de lin, Revue des Composites et des Matériaux Avancés, vol. 16, p. 11, 2006.*
- [8] Ververis, Georghiou, Christodoulakis, Santas, , *Fiber dimensions, lignin and cellulose content of various plant materials and their suitability for paper production, Industrial crops and products, vol. 19, pp. 245-254, 2004.*
- [9] Nardin, *Interfaces fibre-matrice dans les matériaux composites. Application aux fibres végétales, Revue des Composites et des Matériaux Avancés, vol. 16, p. 49, 2006.*
- [10] Djebloun Youcef. Contribution à la caractérisation des matériaux composites renforcés de fibres végétales, these de doctorat, Université Mohamed Khider – Biskra, 2018 ».
- [11] Mme Herroudj Noura , *Etude de l’introduction des fibres d’alfa de tailles différentes dans une matrice polychlorure de vinyle en vue d’améliorer ses propriétés physico-mécanique*, Université Abderrahmane Mira Bejaïa, 2010. »
- [12] Zabia Badr Eddine, Hidani Ibrahim, Mr. Issasfa Brahim. *Extraction et caractérisation mécanique des bio-fibres*, Université Kasdi Merbah Ouargla , 20 ».
- [13] Ben Brahim, Cheikh, *influence of fibre orientation and volume fraction on the tensile properties of unidirectional Alfa-polyester composite, Compos Sci Technol, 67,140-147, (2007).*
- [14] *Composite material handbook*, Materials science corporation, University of Delaware, army research Laboratory, july, (2000). »

- [15] Yahiaoui Lamia, « caractérisation d'un composite à la rupture à base des fibres végétales DISS», option mécanique appliquée, université de Sétif, 2011. »
- [16] Negoudi Abdelhakim Khinech Sayah, Etude de comportement mécanique des composites biosourcés, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2015. »
- [17] Le petit, A. "Élaboration de matériaux composites à base de filaments de cellulose et de polyéthylène", Thèse de doctorat en cotutelle, Université de Limoges, France ».
- [18] Harrache, R. "Elaboration et caractérisations des composites à matrice polymère et à renforts végétal et nanométrique lamellaire", Thèse de magister, Université Ferhat Abbas Sétif-1-, 2015, pp 132. »
- [19] Yahiaoui, L. "Caractérisation d'un composite à la rupture à base des fibres végétales (Diss)", Thèse de magister, Université Ferhat Abbas, Sétif, Algérie, 2011, pp 96. »
- [20] Z. BELKHIR, « Amélioration des propriétés mécaniques des composites à différentes matrices à base de fibres naturelles locales », THÈSE DE DOCTORAT, Larbi Tébessi – Tébessa – Faculté des Sciences et de la Technologie Département de Génie Civil, 2022.
- [21] Steyn, H.J.H. The Evaluation of Conventional Retting versus Solar Baking of Agave Americana Fibres in Terms of Textile Properties. Master's Thesis, University of Free State, Bloemfontein, South Africa, 2006. »
- [22] Mauersberger, H.R. Mathew's Textile Fibres, Their Physical, Microscopic and Chemical Properties, 6th ed.; John Wiley and Sons: New York, NY, USA, 1954; pp. 398–399. »
- [23] BALEY, Fibres naturelles de renfort pour matériaux composites: Ed. Techniques Ingénieur. Matériaux fonctionnels, N° N2220., 2005. »
- [24] M. Ragoubi, Contribution à l'amélioration de la compatibilité interfaciale fibres naturelles/matrice thermoplastique via un traitement sous décharge couronne, Thèse de doctorat, Nancy 1, 2010 ».
- [25] Thi, Vi Vi Do. Matériaux composites à fibres naturelles / polymère biodégradables ou non. Alimentation et Nutrition. thèse de doctorat, Grenoble, L'université de Grenoble, 2011. »
- [26] Alarcón-Gutiérrez, Influence de facteurs abiotiques sur la régulation des paramètres microbiens impliqués dans la dégradation de la matière organique d'une litière forestière méditerranéenne, Thèse de doctorat, Aix-Marseille 3, 2007. »
- [27] BALEY, Fibres naturelles de renfort pour matériaux composites: Ed. Techniques Ingénieur. Matériaux fonctionnels, N° N2220., 2005.
- [28] V. K. Thakur, « Green composites from natural resources ». CRC Press is an imprint of Taylor & Francis Group, an Informa business, (2014), 405 p. ».
- [29] M. Rokbi et H. Osmani, « L'effet des traitements de surface des fibres sur les propriétés mécaniques de composites Polyester-fibres Alfa ». 20ème Congrès Français de Mécanique Besançon, 29 août au 2 septembre (2011). ».

Chapitre III

Extraction Des Fibres Et Élaboration

Des Composites

Chapitre III. Extraction des fibres et Élaboration des composites

III.1. Introduction

Au cours des dernières années, le choix de la qualité de la matrice, la qualité des fibres, et le procédé de fabrication des composites a connu un intérêt croissant dans l'industrie des composites. Ce chapitre est consacré à la présentation des matériaux utilisés pour élaborer les composites (matrice et renfort de fibres) et la technique de leur mise en œuvre.

Nous présentons en première partie la région où les deux types de plantes ont été récoltés puis une présentation des fibres issues de ces deux plantes (Alfa (*Stipa tenacissima*), et, Agave Americana) et les méthodes de leur extraction.

La seconde partie de ce chapitre est consacrée à la présentation de la matrice utilisée, les différentes techniques d'élaboration des plaques de composites unidirectionnels, ainsi que la technique d'évaluation du taux fibres.

III.2. Présentation de la région du Boussaâda

Les deux plantes, "Alfa (*Stipa tenacissima*)" et "Agave americana" sont largement abondantes dans plusieurs régions en Algérie entre autres la région du Boussaâda, dont la capitale est Msila. Notre étude a été limitée seulement sur cette région pour avoir les mêmes facteurs climatiques. La région du Boussaâda est située à la limite d'un grand nombre de milieux écologiques : entre le domaine subhumide, semi-aride, aride et sub-saharien [1].

Les plantes "Alfa (*Stipa tenacissima*)" et "Agave Americana " sont trois espèces prédominants en Algérie en couvrant une surface de 2, 4 et 3 millions d'hectares respectivement [2, 3]. La région du Boussaâda est divisée en quatre zones [1] :

La zone de montagne comprenant les monts du Boussaâda et les monts de l'Atlas Saharien. Cette zone est caractérisée par le faciès écologique qui renferme un ensemble d'écosystèmes forestiers dégradé, matorral (fourré), relique de forêt, steppe à alfa, steppe à armoise, etc...

Une zone plus au moins centrale s'étendant de la région de Barika, entre la zone précédente et la bordure Nord du Chott, vers l'Ouest du bassin et la région d'Ain-El Hadjel et de Sidi Aissa.

Une zone de plaine.

III.3. Présentation des fibres étudiées

III.3.1. Alfa (*Stipa tenacissima*)

La plante "*Stipa tenacissima* L." dénommée aussi "Alfa" est typiquement méditerranéenne dont les grands foyers s'étendent sur les hauts plateaux d'Algérie et du Maroc.

Cette plante est une touffe d'herbe, constituée de tiges de forme cylindrique d'une hauteur maximale d'environ 1m avec une surface spécifique de 3 m² / (Figure III.1). Les fibres Alfa sont principalement composées de 45% de cellulose, 24% d'hémicellulose, 24% de lignine, 2% de cendres et de 5% de cire [4].



Fig.III.1 Plante d'Alfa présente dans la région du Boussaâda (Msila, Algérie)

III.3.2. Agave americana

La plante "*Agave americana*" est une espèce d'Agaves de la famille des "Agavacées". Cette plante est composée d'un rhizome qui donne une fleur dense avec de grandes feuilles rigides contenant à leur extrémité une forte épine brune (Figure III.2). La longueur de ces feuilles varie de 1 à 1,5 m.

L'*Agave americana* naturalisé dans les zones chaudes de la Méditerranée est très répandu dans le Maghreb. Cette espèce est souvent confondue avec l'aloès est appelée à tort "**Essebar**" du fait que le mot "**Sabr**" cité par Ibn El-Baytar, s'applique au genre "**Aloès**". En Algérie, cette plante est extrêmement répandue dans tout le pays. Elle est utilisée pour réaliser des haies impénétrables au bétail [5]. Elle est présente surtout dans le Tell et sur le littoral [6]. Pour les besoins de notre travail, la plante "*Agave americana*" (AG) a été récoltée dans la région du Boussaâda (Msila, Algérie).

Les fibres d'Agave americana sont composées de 68 % de cellulose, 15% de hémicelluloses, 5% de lignine, 0.26% de cires, et 8% d'humidité [7].



Fig.III.2 Plante "Agave Americana" présente dans la région du Boussaâda (Msila, Algérie)

III.4. Préparation des fibres

III.4.1. Agave americana

Nous avons procédé à une préparation et nettoyage de nos feuilles Agave Americana. Avant l'extraction, les épines sur les bords de la feuille et l'épine à l'extrémité de la feuille sont enlevées.



Fig. III.3 Agave americana (a) plante croissante, (b) les lames de la plante

III.4.2. Alfa

Les feuilles sont principalement choisies en fonction de leur couleur (vert à vert clair). Les feuilles sont sélectionnées de manière primitive en se débarrassant de toute feuille avec des taches (blanche, marron, noire...etc.) ou toute autre anomalie physiologique. Cette étape permet de restreindre les facteurs qui peuvent disperser les résultats, notamment ceux des tests de traction sur les fibres.



Fig.III.4 Feuilles d'Alfa sélectionnées.

III.5. Extraction des fibres par rouissage

La méthode d'extraction des fibres utilisées dans ce travail est présentée par la **Figure III.5** et **Figure III.6**, cette technique est nommée le **rouissage**. Elle consiste à plonger les feuilles dans un tonneau (fût) fermé pour séparer les fibres du reste de la lame. Pendant une période de 30 à 45 jours à température ambiante (environ 25 à 30 °C), facilitant ainsi l'extraction. Cette méthode consiste à accélérer la dégradation de la lame de l'agave, ce qui permet la prolifération des bactéries dans un environnement clos.

Après l'extraction des fibres par cette méthode, toutes les feuilles extraites sont lavées avant d'être séchées. Un séchage correct est important car la teneur en humidité des fibres affecte leur qualité. Le séchage artificiel permet d'obtenir des fibres de meilleure qualité que le séchage au soleil [9]. Les fibres ont été séchées à l'ombre pour éviter le blanchiment par la lumière directe du soleil. Les fibres sèches sont ensuite peignées, triées en différentes catégories et mises en balles [3,4]. Finalement les fibres ont été séchées à 70 C° dans une étuve pendant 5 heures, au laboratoire du département Génie Civile de l'université Mohamed Boudiaf de Msila.

La même technique est utilisée pour l'extraction des fibres Alfa (**Fig.III.6**)



Fig.III.5 Différentes étapes de la méthode d'extraction de la fibre d'agave :a) Feuilles plongées dans l'eau ;b) biodégradation des fibres ; c) Fibres lavées à l'eau ; d) fibres séchées à l'air ; e) étuvage des fibres ; f) fibres obtenues.



Fig.III.6 Différentes étapes de la méthode d'extraction de la fibre d'alfa :(a) les feuilles plongées dans l'eau ;(b) et (c) brossage les tiges ; (d) fibres séchées à l'air ; (e) étuvage des fibres ; (f) fibres finales obtenues.

III.6. Matrice (Polyester résine)

Lors de l'élaboration des divers types de bio composites, la résine utilisée est une résine polyester. Cette décision est justifiée car cette résine est l'une des moins chères et convient parfaitement aux composites de grande consommation. De plus, l'utilisation de la résine polyester est principalement destinée pour la production de matériaux composites dont les performances mécaniques ne sont pas très élevées. Les polyesters insaturés sont des résines thermodurcissables liquides qui avec l'adjonction d'un catalyseur (peroxyde organique) avec la possibilité d'intégration de différentes charges minérales pour diminuer le coût et la masse volumique, provoquera une réaction chimique et permet de former les résines polyesters à l'état solide. Il est important de noter que cette réaction chimique est irréversible. La proportion du catalyseur varie selon les durées de polymérisation souhaitées, environ 1% à 2% en volume. Pour maintenir les résines à l'état liquide, on utilise du styrène, composé aromatique à odeur forte caractéristique, comme solvant.

III.7. Élaboration des composites

III.7.1. Préparation de plis unidirectionnels

Nous avons préparé 4 plis unidirectionnels, les fibres extraites des « Agave americana et Alfa » sont pesées séparément soit 4g pour chaque plis avec une balance électronique et de longueur 250mm. Il est nécessaire de disposer les fibres en nappes unidirectionnelles à cette étape du processus. Il s'agit d'une procédure manuelle qui consiste à fixer les fibres longues de manière parallèle et homogène sur des cadres carrés de 200 mm de long et 15 mm de large (Fig.III.7)

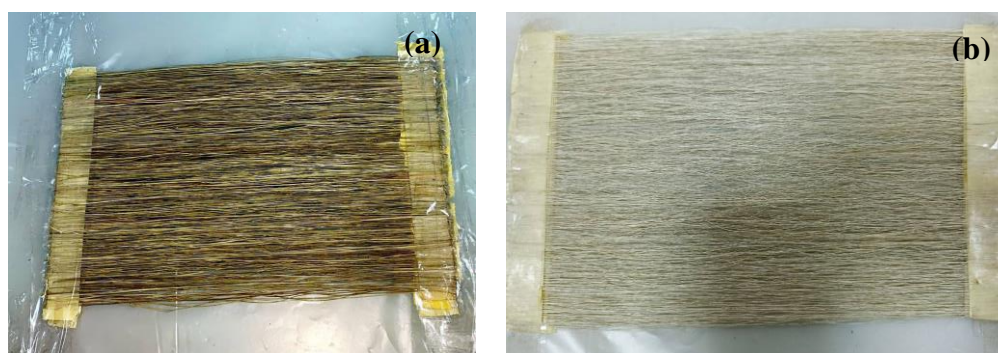


Fig.III.7 plis unidirectionnels de :(a) Alfa ;(b) Agave americana

III.7.2. Procédé de mise en forme (Moulage sous vide)

Dans cette étude, les composites sont obtenus par un empilement de 4 plis de fibres unidirectionnels. Le moulage sous vide dépend de la pompe à vide, ce procédé utilise le vide et la pression atmosphérique simultanément, et la mise en place des fibres avec la résine catalysée dans un moule vitre épaisse avec un couvercle en nylon qui est collé par ruban adhésif installé des manières étanche.

Dans notre travail on a utilisé 200 ml de résine polyester avec 1,5% de durcisseur (Figure.III.8)



Fig.III.8 préparation de la résine.

Le but de cette méthode est d'éliminer les bulles d'air et de préserver ainsi la rigidité des matériaux composites. (Fig.III.9) est laissée à température ambiante afin d'avoir une polymérisation totale, après quoi elle sera découpée en échantillon selon la norme ASTM désirée (de traction ou flexion) et enfin les éprouvettes seront testées.



Fig.III.7 Dispositif du moulage sous vide.

Les plaques bio-composites que nous avons obtenue est présentée dans la (Figure.III.10)



Fig.III.10 Plaques bio-composites.

Pour assurer une polymérisation complète de nos plaques composites, ces dernières ont été mises dans une étuve à une température de 70° pendant 2 heures.

III.7.3. Préparation des échantillons

Les éprouvettes de traction et de flexion trois points, pour les deux types de composites, sont obtenues par découpage des plaques à l'aide d'une tronçonneuse à disque de diamètre, et une vitesse de coupe de 2500 tr/min aux dimensions préconisées à chaque type d'essai (Figure.III.11)



Fig.III.8 Tronçonneuse à disque utilisée pour la découpe des bio-composites

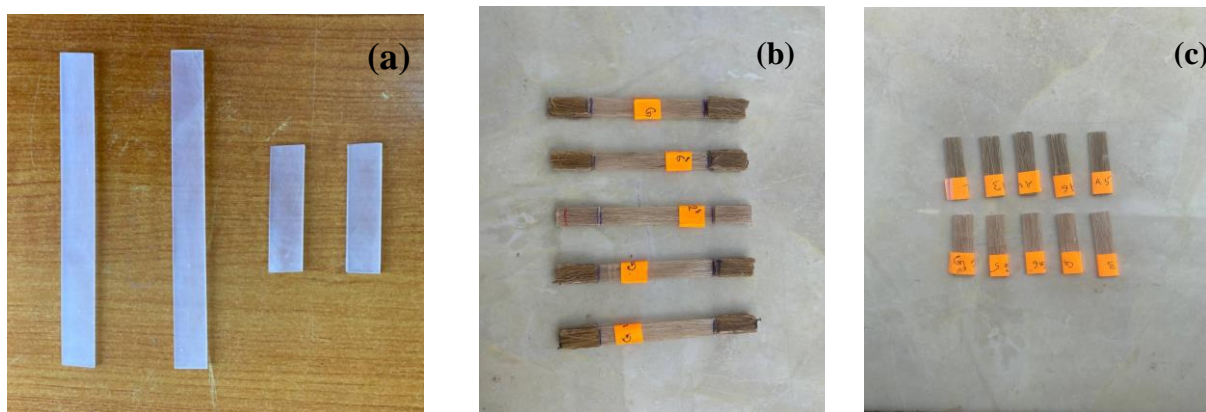


Fig.III.19 Types des éprouvettes obtenus: (a) Traction et Flexion 3-points résine polyester, (b) Traction bio-composites, (c) Flexion 3-points bio-composites.

III.8. Évaluation du taux de fibres

De nombreux essais d'élaboration des composites ont été réalisés en utilisant diverses proportions de fibres afin d'atteindre le pourcentage optimale du renfort dans les composites qui est de 25 %.

Les travaux de Sathishkumar et al. [8] sur les propriétés en traction et en flexion de composites à matrice polyester iso phtalique et renforcée par des fibres de Snake ont mis en évidence que les composites renforcés avec 25% des fibres offrent les meilleures propriétés mécaniques.

Pour ce qui est des composites renforcés de fibres de Napier, Haameem et al. [9] montrent également que c'est le taux de 25% de fibres qui confère au composite la meilleure résistance à la traction et à la flexion.

Pour nos élaborations, les fibres sont pesées au préalable afin de conserver le même taux de fibres en poids (25 %) dans toutes les plaques composites. Pour ce faire, Il est nécessaire de calculer le taux volumique réel de fibres.

III.9. Conclusion

La méthode proposée pour l'extraction des deux types de fibres Alfa (*Stipa tenacissima*), Agave Americana par rouissage est une technique simple, économique et permet de produire d'excellente qualité de fibres longues. De plus, elle offre l'avantage de ne pas faire appel à des produits chimiques.

La technique de moulage par moulage sous vide choisie dans ce travail pour élaborer des plaques composites renforcées par des fibres d'Alfa (*Stipa tenacissima*), d'Agave Americana a montré son effet significatif sur la qualité et les performances du produit final.

Références

- [1] Kamel C. ETUDE ECO-EPIDEMIOLOGIQUE DE LA LEISHMANIOSE CUTANEE DANS LE BASSIN DU HODNA (M'SILA). Thèse de doctorat, Université Ferhat Abbas-Setif 1: 2014.
- [2] Moulay A, Benabdeli K, Morsli A. Contribution a l'identification des principaux facteurs de dégradation des steppes a *Stipa tenacissima* du sud-ouest Algerien. 2011.
- [3] Zeriahene N, Prat R. Goldberg R. Catesson A. Harche-Kaid M. Cell Walls of Seed Hairs from *Lygeum spartum*: Ultrastructure, Composition and Mechanical Properties. *Annals of Botany*, 1998;81:61-6.
- [4] Rokbi M. Herbelot C, Imad A, Osmani H. Benseddiq N, Belouadah Z. Influence of alkali fiber treatment on fracture toughness of alfa fibers reinforced polyester resin.
- [5] Mehdadi Z, Benaouda Z, Latreche A, Benhassaini H, Belbraouet S. Evolution saisonnière de la composition foliaire de *Stipa tenacissima* L. en éléments minéraux et en fibres pariétales. *Acta Botanica Gallica*, 2008;155:435-45.
- [6] Djabeur A, Kaid-Harche M. Khelifi D. Protein's polymorphism of some populations of *Lygeum spartum* L. in Algeria. *American Journal of Agricultural and Biological Sciences*, 2008.
- [7] Muñoz. D. Delgado L. Ochoa M. Chemical composition and in vitro digestibility of herbaceous autochthonous plants in a semi-arid region of Spain. In M. Etienne (Ed.), *Dynamics and sustainability of Mediterranean pastoral systems*, Zaragoza: CIHEAM 1999: 75-78.
- [8] Belouadah Z. Ati A. Rokbi M. Characterization of new natural cellulosic fiber from *Lygeum spartum* L. *Carbohydrate polymers*. 2015;134:429-37.
- [5] Moll L. *Colonisation et agriculture de l'Algérie*: Librairie agricole de la maison rustique: 1845,
- [6] Abdelouahab K. *L'Agave, akar-qacentina*: Constantine-PATRIMOINE:19/07/2011.
- [7] Mylsamy K. Rajendran I. Investigation on physio-chemical and mechanical properties of raw and alkali-treated *Agave americana* fiber. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2010, 29-2925-35.
- [8] Sathishkumar T. Navaneethakrishnan P. Shankar S. Tensile and flexural properties of snake grass natural fiber reinforced isophthallic polyester composites. *Composites Science and Technology*, 2012;72:1183-90.
- [9] Ja MH, Majid MA, Afendi M. Marzuki H. Fahmi L. Gibson A. Mechanical properties of Napier grass fibre/polyester composites. *Composite Structures*. 2016;136:1-10.

CHAPITRE IV

Caractérisation Physico-Chimique et Mécanique En Traction des Fibres Végétales

Chapitre IV. Caractérisation Physico-Chimique et Mécanique En Traction des Fibres Végétales

IV.1. Spectrométrie infrarouge à transformée de Fourier (ATR FTIR)

La spectrométrie infrarouge est une méthode qui permet de déterminer la composition chimique d'un produit en identifiant certaines bandes d'absorption sur un spectre. Toutes les bandes d'absorption représentent un état de vibration d'une liaison chimique entre deux atomes. En identifiant la présence de groupements fonctionnels dans un composé donné, elle permet d'obtenir des données sur sa structure moléculaire. Les spectres infrarouges ont été obtenus en utilisant un spectromètre de type Perkin Elmer Spectrum 100 et son logiciel d'analyse quantitative.

Les analyses ATR-FTIR sur fibre, ont été réalisées au du laboratoire de génie mécanique (Université Mohamed Boudiaf de Msila) ([Figure.IV.1](#)), analysées par cet appareil avec une entre 500 et 4000 cm^{-1} avec une résolution de 2 cm^{-1} .



Fig.IV.1 Présentation globale du modèle ATR-FTIR Perkin Elmer Spectrum 100.

Pour la préparation des échantillons, les faisceaux de fibres (Agave Americana et Alfa) ont été coupés puis broyés afin d'obtenir une poudre. Cette dernière est placée sur le cristal ATR de la machine.

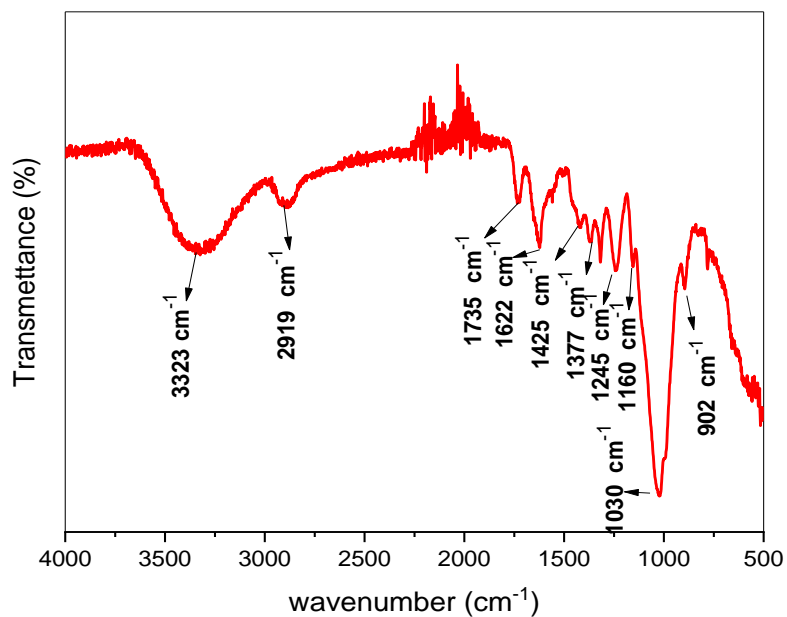


Fig.IV.2 Spectre ATR-FTIR de la fibre d'Agave Americana.

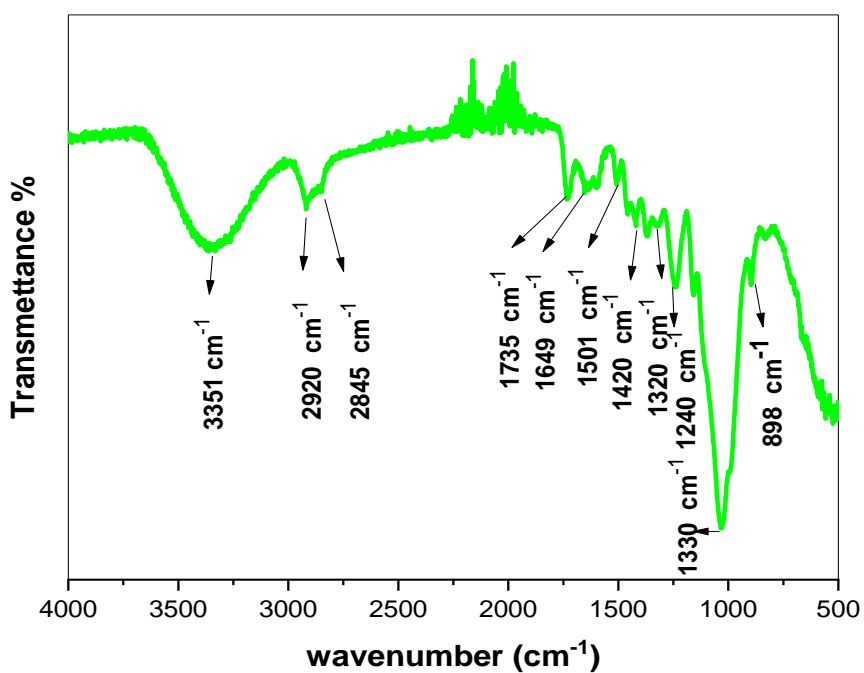


Fig.IV.3 Spectre ATR-FTIR de la fibre d'Alfa (*Stipa tenacissima L.*)

Tableau IV. 1 Identification des pics les plus importants du spectre ATR-FTIR selon les études issues de la littérature [3,6-13].

Nombre d'ondes (cm ⁻¹)	Positions des Bands (cm ⁻¹)		Groupe fonctionnel	Source
	Agave (Americana)	Alfa		
3600–3100	3323	3351	OH-étirement	Cellulose, Hémicellulose
2950 et 2854	2919	2920 et 2845	CH ₂	Cellulose, Hémicellulose
1740-1600	1735et 1622	1735 et 1649	C=O	Cellulose, Hémicellulose
1460	-	1501	C=C	Lignine, Hémicellulose
1430	1425	1420	CH ₂	Lignine, Hémicellulose
1377	1377	1330	C-H	Lignine
1320	-	1320	CH ₂ et CH ₃	Cellulose
1243	1245	1240	-COO	Hémicellulose
1055	1030	1030	C-O	Cellulose
1160	1160	-	C-O-C	Cellulose, Hémicellulose
894	902	898	Liaison glycosidique	Cellulose, Hémicellulose

L'analyse ATR-FTIR a permis d'obtenir une indication qualitative concernant la structure chimique de nos deux fibres "Alfa" et "Agave Americana". Les spectres ATR-FTIR obtenus sur les échantillons issus des deux fibres ainsi que l'identification des différents pics présentés dans les (Figure.IV.2) et (Figure.IV.3) et le Tableau IV.1 représente les nombres d'onde des pics les plus importants avec leur identification mentionnée dans la littérature.

Nous constatons la présence d'une grande bande d'absorption autour de 3351 cm^{-1} , attribuée au groupe hydroxyle (OH) [3]. Les deux pics autour de 2920 cm^{-1} et 2845 cm^{-1} sont associés aux groupes (CH_2) de la cellulose et de l'hémicellulose [9]. Le nombre d'onde à 1735 cm^{-1} et celui à 1649 cm^{-1} correspondent aux groupes de carbonyle (C=O) de la lignine et d'hémicellulose [3,8] tandis que la très faible intensité de la bande à 1501 cm^{-1} correspond au groupes (C=C) de la lignine [7, 10]. Le pic vers 1420 cm^{-1} est lié aux groupes (CH_2) de la cellulose. Le pic vers 1330 cm^{-1} est associé à des groupes (C-H) de la cellulose [11]. Le pic autour de 1320 cm^{-1} est associé aux groupes (CH_2) et (CH_3) de la lignine [14]. Ce pic est plus intense dans le spectre de la fibre Agave. Le pic localisé à 1240 cm^{-1} est relatif aux groupes (-COO) de l'hémicellulose [8]. En outre, à 1158 cm^{-1} nous avons identifié des groupes (C-O-C) de la cellulose et de l'hémicellulose [10, 12]. Le nombre d'onde autour de 1030 cm^{-1} correspond au groupes (C-O) de la cellulose [9, 13]. En outre, la présence d'un pic autour de 898 cm^{-1} est attribué aux groupes (CO) qui sont associés aux liaisons B-glycosuriques [8, 12].

IV.2. Diffraction des rayons X

La diffraction des rayons X permet d'analyser l'évolution de la structure cristalline (taux de cristallinité). On a procédé à un broyage mécanique fin des fibres, puis un tamisage ($< 150\text{ }\mu\text{m}$).

Les analyses ont été réalisées sous vide à l'aide d'un générateur de rayons X PANalytical X'Pert, avec une tension 40 kV et une intensité de 40 mA. Les fibres sous forme de poudre sont analysées par mise dans un moule en acier rectangulaire (15 x 10 mm). Le balayage atteint une vitesse de $2^\circ\text{C}/\text{min}$ avec des intervalles d'enregistrement de 0,02 sec. On choisit l'angle de diffraction entre 5 et 75° .

IV.3. Propriétés mécaniques des fibres

Caractériser les performances mécaniques en traction des fibres demeure primordiales lorsqu'on projette de les utiliser comme renforts pour les matériaux composites. Pour le cas de nos deux types de fibres "Alfa" et "Agave Americana", les essais de traction permettant de déterminer le module de Young, la contrainte à la rupture et la déformation à la rupture sont conduits selon la méthode standard ASTM D3322-01 de test de traction d'une fibre unitaire.

Pour chaque type de fibres, nous avons pris 25 fibres pour les essais de traction. La machine utilisée est de type **Teste** avec une cellule de charge de 2,5 KN ([Figure.IV.4](#)).

Nous avons choisie pour l'ensemble des 50 essais une longueur de jauge de 40 mm et une vitesse de la traverse mobile de 2mm/min.

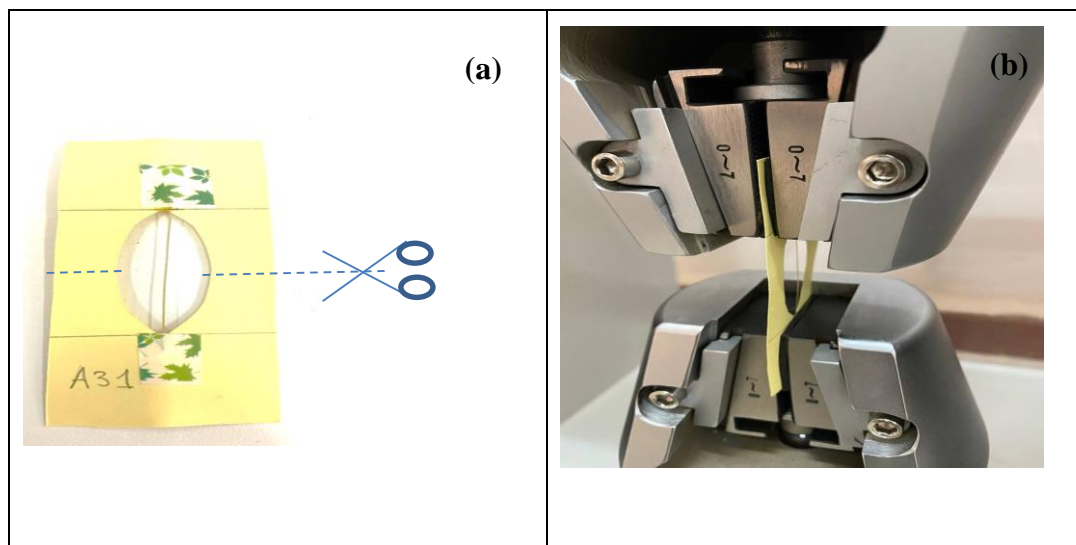


Fig.IV.4 Essai de traction : (a) Préparation des éprouvettes de traction ;(b) Éprouvettes d'essai sollicitée en traction jusqu'à la rupture.

La courbe type contrainte-déformation obtenue à partir des essais en traction statiques des fibres étudiées respectivement pour l'*Alfa* (Figure III.5) et la fibre d'*Agave americana* (Figure III.6), montre que la fibre alfa possède un comportement linéaire élastique et fragile avec une baisse soudaine de la contrainte.

Cependant, on remarque un comportement différent pour la fibre d'agave (Figure III.6), Pour toutes les fibres testées, deux stades de comportement sont observés. La première montre une région linéaire élastique ($\epsilon = 2\%$) avec une pente très importante suivie par une seconde étape caractérisée par de transition non linéaire et enfin par un comportement pratiquement linéaire, mais avec une pente beaucoup plus faible que celle de la première zone, jusqu'à la rupture brutale de la fibre. Il est important de signaler aussi que la deuxième phase (zone de transition non linéaire) se caractérise parfois par des discontinuités qui correspondent à la rupture de quelques micro-fibrilles pour quelques échantillons testés. Bessadok et al. [5] interprète l'allure de ces courbes comme le comportement d'un matériau dur. Comme c'est le cas pour presque toutes les fibres naturelles.

Le Tableau IV.2 rassemble pour nos deux types de fibres "Alfa" et "Agave Americana", les contraintes de rupture (résistance à la traction) et les déformations à la rupture obtenues sur 30 échantillons par type de fibres. Pour situer nos résultats, nous avons rajouté à ce tableau les résultats obtenus par d'autres auteurs qui sont mentionnés dans la littérature.

Une grande dispersion des valeurs des propriétés mécaniques en traction est observée sur l'ensemble des essais.

Les causes de cette dispersion sont de deux types selon les investigations de :

- Causes internes : elles sont associées aux conditions de croissance des fibres, à la diversité, à la position de la fibre dans la plante, à l'hétérogénéité des fibres et à la disparité de cristallinité de la cellulose d'une zone à une autre.
- Causes externes : elles sont associées aux conditions de test. Par exemple, il est possible de constater que le collage d'une fibre ne garantit pas une détermination précise de la longueur de jauge, car la colle enrobe parfois une partie de la fibre par capillarité. Il est également à noter que l'humidité ambiante altère les caractéristiques de la fibre.

L'analyse de traction de la fibre Alfa ont permis d'obtenir les principaux paramètres mécaniques dont la contrainte à la traction, le module d'Young et la déformation à la rupture, ces caractéristiques sont respectivement de $269,17 \pm 70,32$ MPa, $14,875 \pm 8,6$ GPa et $1,77 \pm 0,52$ %. Ces propriétés ont été comparées à d'autres fibres naturelles issues de la littérature publiée et elles sont présentées dans le [Tableau. IV.2](#)

L'analyse de traction des fibres agave ont permis d'obtenir les principaux paramètres mécaniques dont la contrainte à la traction, le module d'Young et la déformation à la rupture, ces caractéristiques sont respectivement de $228,97 \pm 47,76$ MPa, $4,83 \pm 1,027$ GPa et $20,26 \pm 5,32$ %. Ces propriétés ont été comparées à d'autres fibres naturelles issues de la littérature publiée et elles sont présentées dans le [Tableau. IV.2](#)

Tableau. IV.2 Propriétés mécanique des fibres Alfa et Agave Americana.

Fibres	Contrainte (MPa)	Module de Young (Gpa)	Déformation à la rupture (%)
Alfa	$269,17 \pm 70,32$	$14,875 \pm 8,6$	$1,77 \pm 0,52$
Agave. Americana	$228,97 \pm 47,76$	$4,83 \pm 1,027$	$20,26 \pm 5,32$

En se référant à la fourchette des dispersions des résultats, nous pouvons dire que c'est la fibre de "Alfa"(Stipa tenacissima) qui offre en moyenne le meilleur module de Young, la meilleure contrainte à la rupture et une petite déformation à la rupture. Il est remarquable de constater le même ordre de grandeur sur la fourchette des dispersions de la déformation à la rupture pour la fibre "Alfa"(Stipa tenacissima). C'est la fibre "Agave americana" qui possède la plus grande déformation à la rupture et les plus faibles valeurs du module de Young et de la contrainte à la rupture.

Certains chercheurs ont caractérisé la résistance à la traction de plusieurs fibres telles que *Kénaf libérienne* (427-519 MPa), *Spatha* (75,66 MPa) [3], *Sisal* (274-526 MPa) [29], et le *palmier dattier* (170 - 275 MPa) [33].

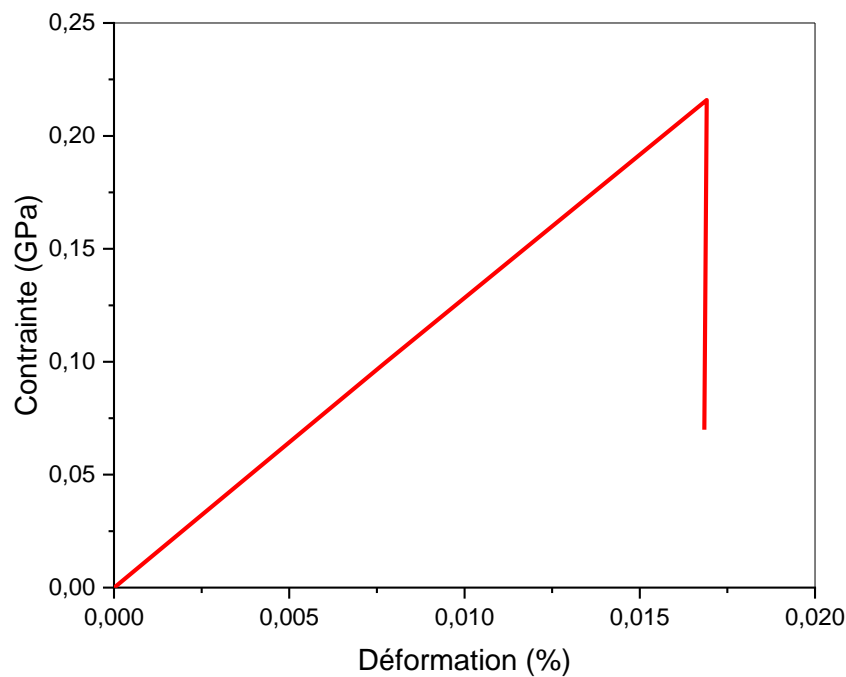


Fig. IV. 2 Courbe type (σ , ϵ) en comportement contrainte-déformation de la fibre d'Alfa.

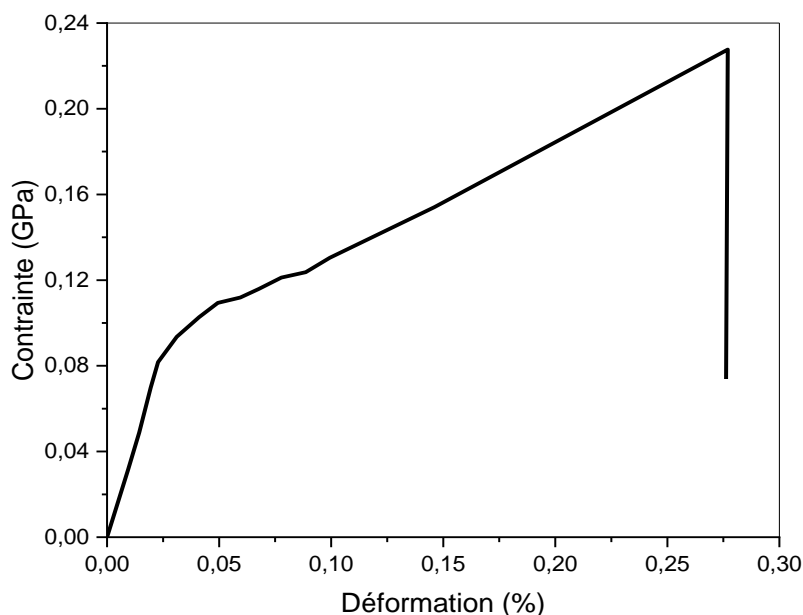


Fig. IV. 3 Courbe type (σ , ϵ) en comportement contrainte-déformation de la fibre d'Agave Americana.

IV.4. Étude statistique du comportement en statique des fibres Alfa et Agave Americana

Ce partie est subdivisé est présentée la théorie de la distribution de Weibull à 2 paramètres qui a été appliquée pour estimer les propriétés mécaniques à savoir la contrainte, la déformation à la rupture et le module de Young des fibres d'Alfa et d'Agave Americana, qui ont montré une grande dispersion dans les résultats des essais de traction statique. On vérifie aussi l'influence des facteurs explicatifs (variable indépendante c'est à dire les concentrations), si elles ont un impact significatif sur les variables dépendantes (contrainte et module de Young).

IV.4.1. Analyse statistique

Les fibres reprennent presque la totalité de l'effort axial et, par conséquent, contrôlent la rupture du composite. Étant donné que ces dernières sont constituées de matériaux fragiles, la rupture s'initie habituellement à la racine d'une fissure ou d'un défaut. La fibre peut être idéalisée par une chaîne dont les différents maillons partagent la même charge mais ont des résistances ultimes différentes. Il y aura rupture de la chaîne ou de la fibre lorsque la contrainte axiale aura atteint la valeur de la contrainte ultime du lien le plus faible. Ce concept est souvent

désigné par la Théorie du Lien Faible [1]. De plus, la répartition et la taille des défauts, ou plutôt la résistance ultime d'un lien, suit une certaine distribution statistique. En effet, les défauts sont généralement introduits par des causes inconnues ou hors contrôle dont la somme des effets peut être modélisée par une distribution statistique.[2]

IV.4.2. Analyse Statistique de Weibull

L'analyse semi-empirique de Weibull est souvent utilisée dans le cas d'un état de contrainte uniaxial et pour les matériaux fragiles. Elle consiste à relier la probabilité d'une population d'échantillons survivants à un essai de chargement.

IV.4.3. Résultats et discussions :

Les propriétés mécaniques sont analysées par l'utilisation des lois de Weibull à 2 paramètres afin de déterminer la distribution la mieux adéquate. Dans les [Figures IV.7. IV.8 et IV.9](#) sont respectivement représentés seulement les résultats de distribution de Weibull pour les contraintes et les déformations à la rupture et le module de Young et les déformations à la rupture des fibres d'Alfa et d'Agave Americana représentant les meilleures augmentations des propriétés mécaniques. Par contre, tous les résultats obtenus sont regroupés dans les [Tableaux IV.3](#).

Les modules m de Weibull à 2 paramètres sont déterminés graphiquement par une équation linéarisée (la méthode des moindres carrées 'least square estimation qui représente la pente de la courbe. De même, on peut déterminer les facteurs de forme et d'échelle, cette méthode permet de déterminer les modules (m), ainsi que la comparaison entre les différentes hypothèses liées à la nature des résultats expérimentaux obtenus.

La [Figure IV.7](#) permet de comparer le type de probabilités à deux paramètres pour les contraintes à la rupture. À titre d'exemple, si on prend le module (m) et la contrainte caractéristique (σ_0) de Weibull à deux paramètres pour la fibre d'Alfa qui sont de l'ordre de: $m = 3,89$ et $\sigma_0 = 269,17$ MPa, De la même manière, le m et σ_0 déterminé par Weibull à deux paramètres pour la fibre d'Agave Americana, qui sont de l'ordre de: $m = 4,52$ et $\sigma_0 = 293,93$ MPa.

L'analyse des résultats obtenus, montre que les estimations de contraintes moyennes obtenues pour les fibres d'Alfa et d'Agave Americana sont proches de ceux obtenus expérimentalement. En d'autres termes, les valeurs de σ_0 obtenues par Weibull à deux paramètres sont égale 269,17 MPa et 293,93 MPa respectivement pour les fibres d'Alfa et d'Agave Americana sont proche de celles obtenues expérimentalement qui sont respectivement 213,17 MPa et 228,97 MPa.

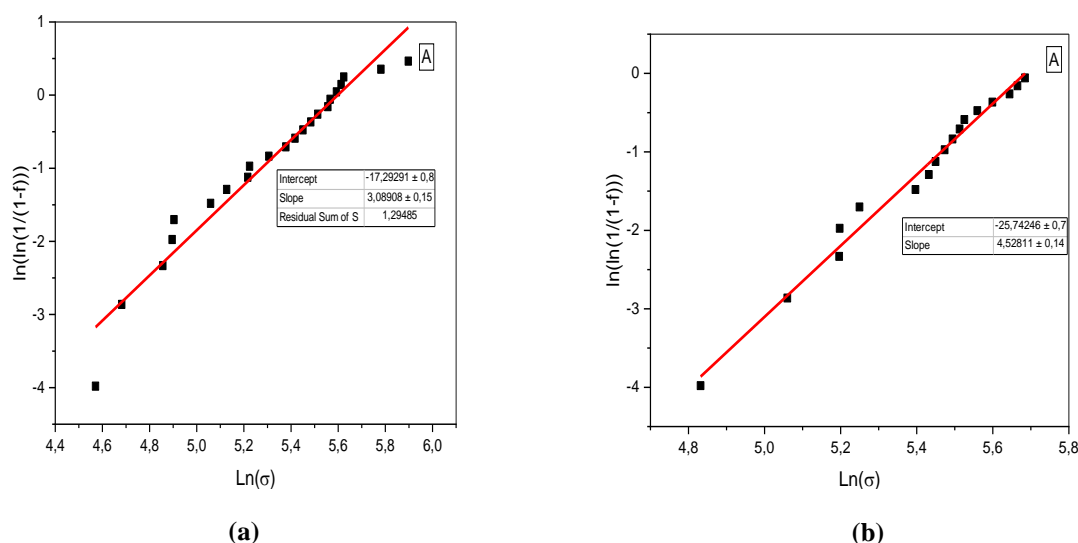


Fig.IV.7 : Distribution de Weibull à 2 paramètres pour les contraintes à la rupture des fibres : (a) d'Alfa, (b) Agave Americana.

La Figure IV.8 permet de comparer les valeurs obtenues des modules de Young (E_0) et de Weibull (m) obtenus par les deux types de probabilités à deux paramètres. À titre d'exemple, si on prend le module (m) et le module de Young caractéristique (E_0) de Weibull à deux paramètres pour la fibre d'Alfa qui sont égales respectivement à $m = 5,3$ et $E_0 = 17,36$ GPa. De la même manière, le m et (E_0) déterminé par Weibull à deux paramètres pour la fibre d'Agave Americana, qui sont de l'ordre $m = 4,63$ et $E_0 = 6,17$ GPa.

L'analyse des résultats obtenus, montre les estimations moyennes des modules de Young obtenus pour les fibres d'Alfa et d'Agave Americana sont proches de ceux obtenus expérimentalement. En d'autres termes, les valeurs de (E_0) obtenues par DISTRIBUTION DE Weibull à deux paramètres sont égales respectivement 17,36 GPa et 6,17 GPa pour les fibres d'Alfa et d'Agave Americana sont proche de celles obtenues expérimentalement qui sont 14,87 GPa et 4,83 GPa respectivement.

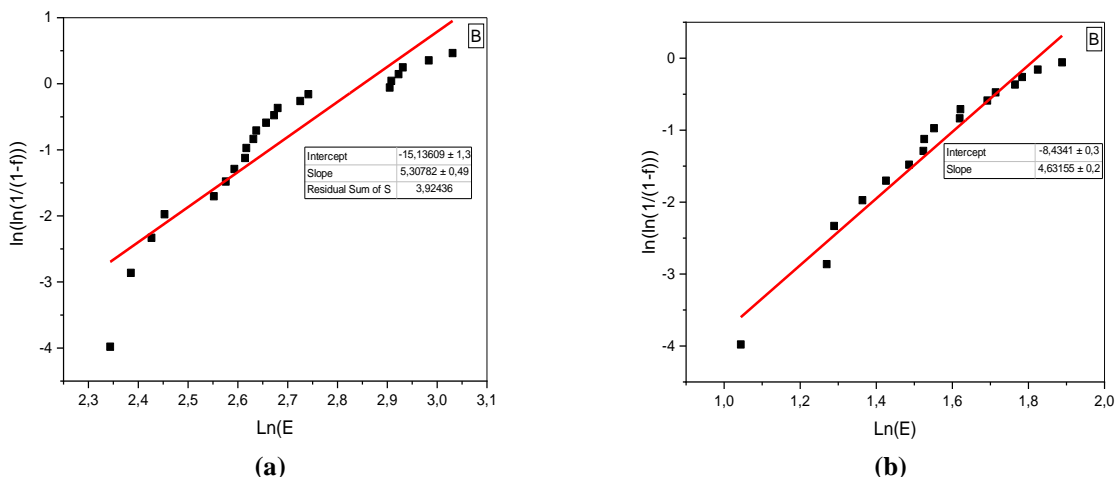


Fig. IV.8 Distribution de Weibull à 2 paramètres pour les modules de Young des fibres : (a) d’Alfa, (b) Agave Americana.

La Figure IV.9 représente les déformations à la rupture. On constate que le module (m) et la déformation caractéristique ($\mathcal{E}0$) de Weibull à deux paramètres pour la fibre de palmier non traitée sont égaux respectivement à 3,39 et 2,2 %. Le module (m) et la déformation caractéristique ($\mathcal{E}0$) de Weibull à deux paramètres pour la fibre de sont de l’ordre de : $m = 3,19$ et $\mathcal{E}0 = 28,71 \mu\text{m}$.

Il est à noter que la distribution de Weibull à deux paramètres est adéquate pour l’estimation de la déformation à la rupture des fibres car les résultats obtenus par cette méthode sont plus proche de ceux obtenus expérimentalement qui sont respectivement : 1,77 et 20,26 μm .

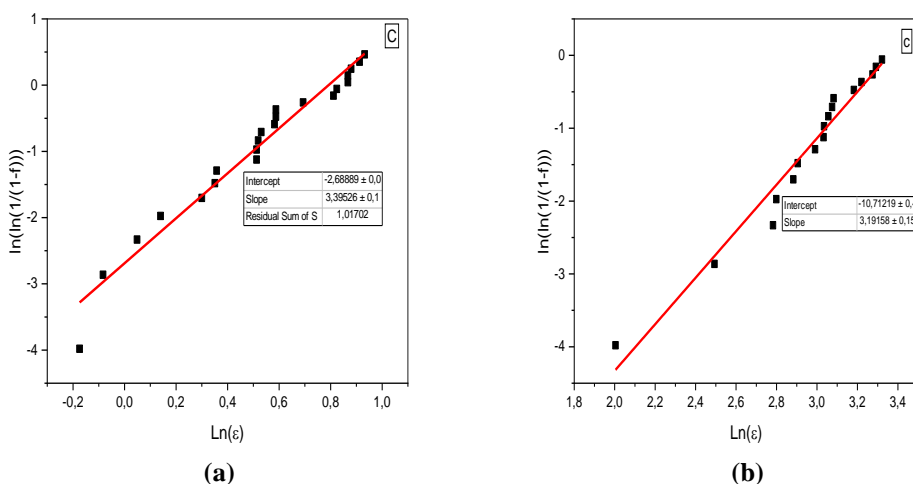


Fig. IV. 9 : Distribution de Weibull à 2 paramètres pour les déformations à la rupture des fibres : (a) d’Alfa, (b) Agave Americana

Le **Tableau IV.3** regroupent tous les résultats obtenus des propriétés mécaniques (respectivement, contraintes, module de Young et déformation à la rupture) expérimentales et ceux estimés par la méthode de Weibull à deux paramètres pour les fibres Alfa et Agave Americana

Tableau IV.3 : Résultats des probabilités de Weibull pour les propriétés mécaniques des fibres Alfa et Agave Americana.

Plants	Contraintes à la rupture (MPa)			Module de Young (GPa)			Déformation (μm)		
	Weibull		exp	Weibull		exp	Weibull		exp
	M	σ_0	σ	m	E_0	E	m	ε_0	ε
Agave	4,52	293,93	228,97	4,63	6,17	4,83	3,19	28,71	20,26
Alfa	3,89	269,9	213,17	5,3	17,36	14,87	3,39	2,2	1,77

IV.5. Conclusion

Les caractérisations physico-chimiques et mécaniques sont réalisées sur deux types de fibres "Alfa"(Stipa tenacissima et Agave Americana).

Les résultats issus de la caractérisation morphologique, physico-chimique, thermique, et mécanique sur les fibres "Agave Americana", qui sont valorisées pour la première fois en tant que renfort des matériaux composites, sont comparables à ceux obtenus sur les autres types de fibres naturelles d'usage usuel.

La caractérisation physico-chimique (ATR-FTIR et DRX) montre que les trois fibres sont riches en cellulose.

La caractérisation mécanique en traction sur les fibres unitaires montre que c'est la fibre "Alfa"(Stipa tenacissima) offre en moyenne le meilleur module de Young et la meilleure contrainte à la rupture avec une petite déformation à la rupture. Par contre la fibre " Agave Americana " possède des valeurs de déformation à la rupture très élevées et des valeurs du module de Young et de la contrainte de rupture très faibles.

L'étude expérimentale sous chargement statique menée en chapitre IV présente une grande dispersion des résultats pour le module de Young, la contrainte et la déformation à la rupture en traction. Pour ce faire, on a eu recours aux méthodes statistiques pour apporter une estimation

probable du comportement fragile des fibres végétales, à savoir la distribution de Weibull à 2 paramètres. Les principales conclusions sont comme suit :

- La distribution de Weibull à deux paramètres a bien décrit les résultats expérimentelle.

References

- [1] Sreenivasan V, Somasundaram S, Ravindran D, Manikandan V, Narayanasamy R. Microstructural, physico-chemical and mechanical characterisation of *Sansevieria cylindrica* fibres-An exploratory investigation. *Materials & Design*. 2011;32:453-61.
- [2] Williams GI, Wool RP. Composites from natural fibers and soy oil resins. *Applied Composite Materials*. 2000; 7:421-32
- [3] Sathishkumar T, Navaneethakrishnan P, Shankar S, Rajasekar R. Characterization of new cellulose *sansevieria ehrenbergii* fibers for polymer composites. *Composite Interfaces*. 2013;20:575-93,
- [4] Sathishkumar T, Navaneethakrishnan P, Shankar S, Rajasekar R, Rajini N. Characterization of natural fiber and composites-A review. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2013;32:1457-76.
- [5] Dallel M. Evaluation du potentiel textile des fibres d'Alfa (*Stipa Tenacissima* LJ: caractérisation physico-chimique de la fibre au fil. Thèse de doctorat, Université de Haute Alsace-Mulhouse; 2012.
- [6] Indran S, Raj RE, Sreenivasan V. Characterization of new natural cellulosic fiber from *Cissus quadrangularis* root. *Carbohydrate polymers*. 2014;110:423-9.
- [7] Saravanakumar S, Kumaravel A, Nagarajan T, Sudhakar P, Baskaran R. Characterization of a novel natural cellulosic fiber from *Prosopis juliflora* bark. *Carbohydrate polymers*. 2013;92:1928-33.
- [8] Reddy KO, Ashok B, Reddy KRN, Feng Y, Zhang J, Rajulu AV. Extraction and characterization of novel lignocellulosic fibers from *Thespesia lampas* plant. *International Journal of Polymer Analysis and Characterization*, 2014;19:48-61.
- [9] Fiore V, Scalici T, Valenza A. Characterization of a new natural fiber from *Arundo donax* Las potential reinforcement of polymer composites. *Carbohydrate polymers*. 2014;106:77-83.
- [10] De Rosa IM, Kenny JM, Puglia D, Santulli C, Sarasini F. Morphological, thermal and mechanical characterization of okra (*Abelmoschus esculentus*) fibres as potential reinforcement in polymer composites, *Composites Science and Technology*. 2010;70:116-22

[11] Subramanian K. Kumar PS, Jeyapal P. Venkatesh N. Characterization of ligno-cellulosic seed fibre from *Wrightia Tinctoria* plant for textile applications-an exploratory investigation. *European Polymer Journal*, 2005;41:853-61

[12] Seki Y, Sarikanat M. Sever K, Durmuşkahya C. Extraction and properties of *Ferula communis* (chakshir) fibers as novel reinforcement for composites materials. *Composites Part B: Engineering*. 2013;44:517-23,

[29] De Andrade Silva F, Chawla N. de Toledo Filho RD. Tensile behavior of high performance

[33] Al-Khanbashi A. Al-Kaabi K. Hammami A. Date palm fibers as polymeric matrix reinforcement: fiber characterization. *Polymer composites*. 2005;26:486-97.

[34] Beakou A, Ntenga R. Lepetit J. Ateba J, Ayina L. Physico-chemical and microstructural characterization of "*Rhectophyllum camerunense*" plant fiber. *Composites Part A: Applied*

CHAPITRE. V :
Caractérisation Des Composites
Unidirectionnels

Chapitre V. Caractérisation Des Composites Unidirectionnels

V.1. Caractérisation des composites unidirectionnels

Les deux types de matériaux composites unidirectionnels, élaborés sous forme de plaques d'épaisseur 2mm, sont à base d'une résine thermodurcissable de type "Polyester" renforcée soit par des fibres de Alfa « Stipa tenacissima » (composite type 1) ou par des fibres d'Agave americana (composite type 2).

Les techniques de caractérisation utilisées dans cette étude concernent :

L'essai de traction afin d'évaluer les propriétés mécaniques des matériaux (module de Young, la contrainte de rupture et la déformation à la rupture) sur 6 échantillons par type de composite.

L'essai mécanique de flexion trois points pour évaluer le module de Young et la résistance à la flexion.

Il est à signaler, que le module de Young et la contrainte en flexion des trois matériaux composites sont également déterminés.

Par ailleurs, pour mettre en évidence l'effet bénéfique des fibres végétales comme renfort du composite à matrice Polyester, nous avons élaboré des éprouvettes en Polyester. Ces dernières ont été soumises aux mêmes méthodes de caractérisation utilisées pour les matériaux composites. Les résultats obtenus sont comparés à ceux obtenus sur les composites.

V.1.1. Essais de traction

Six essais de traction sont réalisés par type de composite sur des éprouvettes de dimensions (épaisseur 2 mm, largeur de 6 mm, longueur de 100 mm (Figure IV.1). La vitesse de la traverse mobile est de 2 mm/min.: Épaisseur $h \times$ largeur $b \times$ longueur $L=2 \times 6 \times 100 \text{ mm}^3$

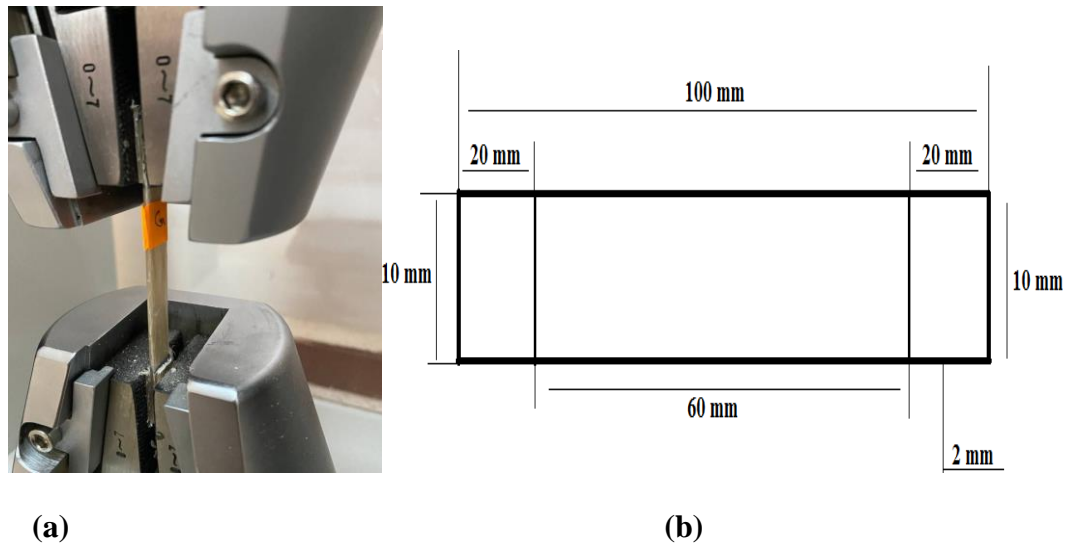


Fig.V.1 Essais de traction : (a) : Montage de l'éprouvette (b) : dimensions de l'éprouvette de traction

V.1.2. Essais de flexion trois points

Les essais de flexion trois points sur les différentes éprouvettes sont exécutés sur des éprouvettes d'essais en flexion selon la norme ASTM D790-10. Un dispositif de flexion trois points est adapté dans la machine de traction de type **Teste**. Cette dernière est équipée d'une cellule de charge de 10 KN. La vitesse est de 2mm/min (Figure IV. 3a). Le rapport de de dimensions $(h \times b \times L) = (2 \times 10 \times 40) \text{ mm}^3$, La distance entre appuis $D = 16 * e$ (32mm). Les valeurs de la force et de déplacement de la traverse mobile sont enregistrées simultanément.

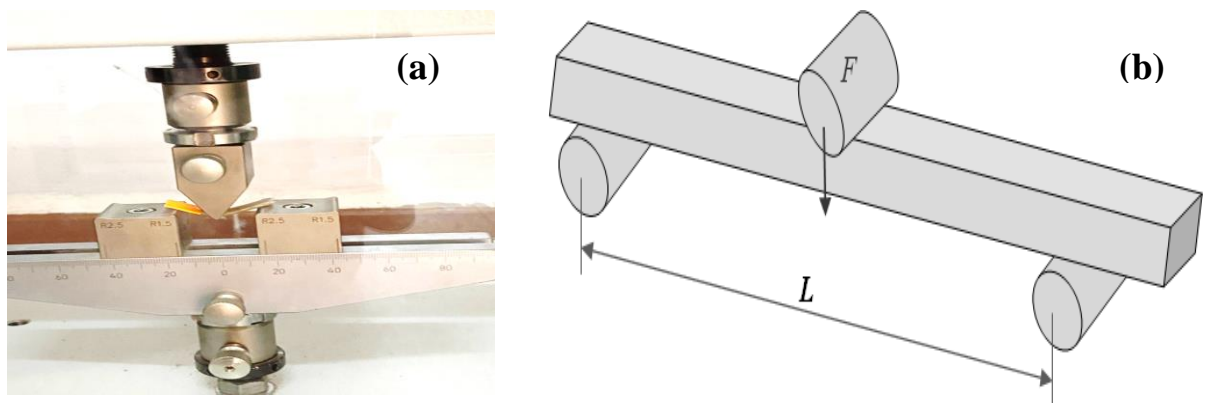


Fig.V.2 Dispositif pour la flexion trois points : (a): Montage de flexion 3 points ; (b) : Schéma de l'éprouvette de flexion

V.2. Résultats et discussions

V.2.1. Essai en traction

Le comportement mécanique d'un matériau composite dépend essentiellement de la nature de la matrice et de la fibre, le taux de fibres ainsi que de la qualité de l'adhésion interfaciale Fibres/Matrice. Par exemple, dans les travaux de sa thèse de doctorat, Aucher [5] a mis en évidence deux modes de rupture en traction des composites UD selon la déformation à rupture de la fibre et de la matrice individuellement:

- Rupture des fibres lorsque la déformation à la rupture des fibres est inférieure à celle de la matrice ($\epsilon_f < \epsilon_m$).
- Rupture transverse de la matrice lorsque ($\epsilon_f < \epsilon_m$).

Les (Figures.V.3), (Figures.V.4) rassemble les courbes typiques contrainte-déformation en traction de la matrice Polyester et des deux composites " Polyester /Alfa", " Polyester /Agave Americana" et. Cette figure appelle les remarques suivantes :

- L'effet bénéfique des fibres comme renforts d'un matériau composite à matrice Polyester est clairement établi au vu de la résistance élevée à la déformation des deux types de composites par rapport à la résine pure.

V.2.1.1. Caractérisation mécanique en traction de la résine polyester

Les propriétés mécaniques dépendent essentiellement de la structure chimique du pré polymère, du taux de solvant contenu dans la résine et du type du réseau tridimensionnel formé après durcissement.

Les essais de traction ont été effectués jusqu'à la rupture des éprouvettes de la résine polyester, pour assurer une bonne reproductibilité des résultats, Six éprouvettes au moins sont testées à une vitesse de 1 mm/min. Les dimensions des éprouvettes sont préparées selon la Norme ASTM 3039 M- 08 où $L = 100$ mm, $b = 10$ mm et $h = 2$ mm qui sont respectivement la longueur, la largeur et l'épaisseur des éprouvettes testées. Alors que la longueur entre les mors prise pour ces essais est de 60 mm et la longueur des étalons est égale à 40 mm

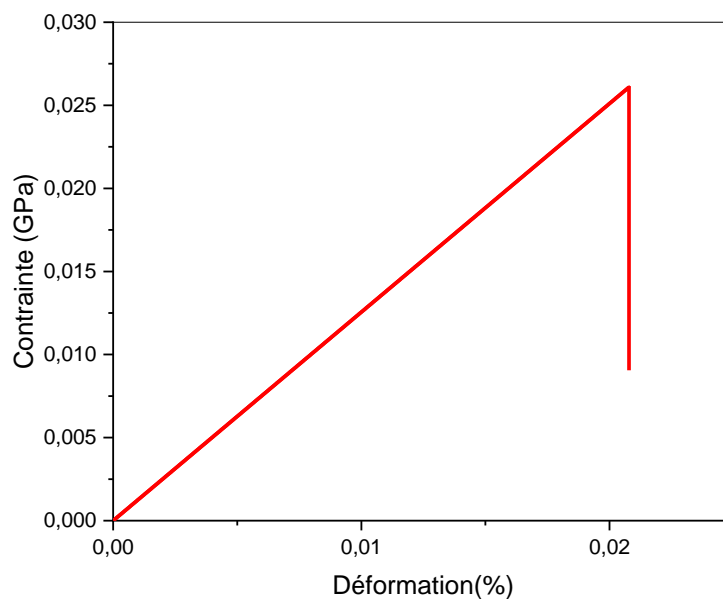


Fig.V.3 : Courbes types (σ , ϵ) en traction de résine.

Représente la courbe de l'évolution de la contrainte en fonction de la déformation de la résine polyester testée en traction statique. Cette évolution se caractérise par une seule phase linéaire élastique. Ainsi, le polyester a un comportement purement fragile. Le test nous a permis de déterminer la valeur de la déformation moyenne à la rupture du de la résine polyester qui est de l'ordre de $26,08 \pm 6,2$ MPa

V.2.1.2. Caractérisation mécanique en traction des bio-composites

Il s'agit de déterminer les contraintes à rupture et le module de Young des composites à renfort Alfa et agave americana.

Le comportement du matériau composite à base de polyester renforcé par les fibres Alfa présente un comportement linéaire élastique de nature fragile (Figure.V.3) où la déformation demeure proportionnelle à la contrainte jusqu'à la rupture du composite. La déformation en traction de ce composite semble être gouverné par celle de la résine pure en polyester dont la courbe en traction présente également une zone linéaire suivi d'une autre zone non linéaire jusqu'à 6% de déformation avant la rupture. Par ailleurs, la comparaison de la déformation moyenne à la rupture du composite " Polyester /Alfa" ($\epsilon = 0,88 \pm 0,92\%$) avec celle de la résine polyester ($\epsilon = 1,21 \pm 0,88\%$) dénote de la présence d'une faible adhésion entre les fibres d'Agave. A et la matrice.

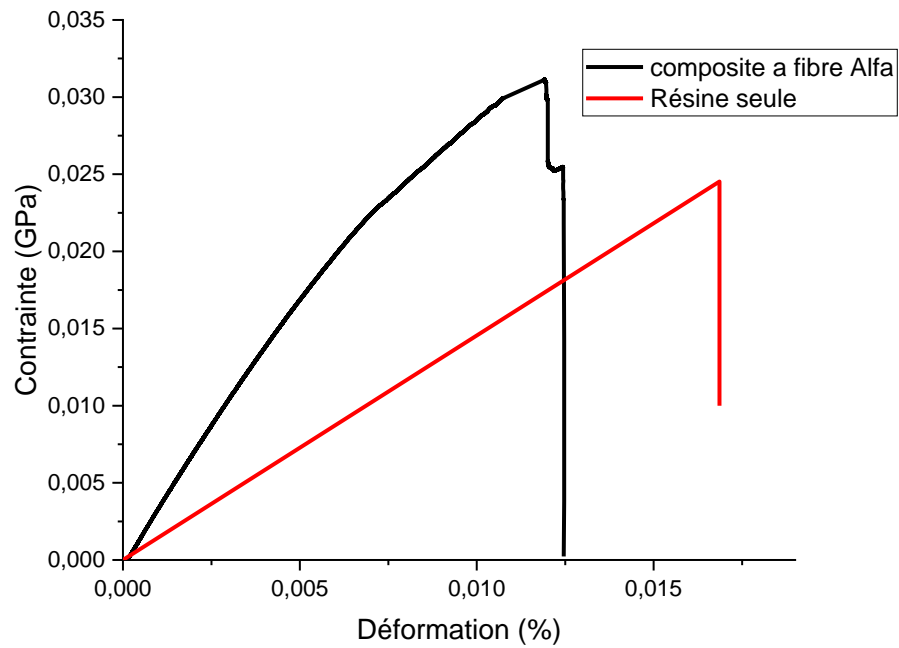


Fig.V.2 Courbes types (σ , ϵ) en traction de la résine seule et de composite à fibre d'Alfa

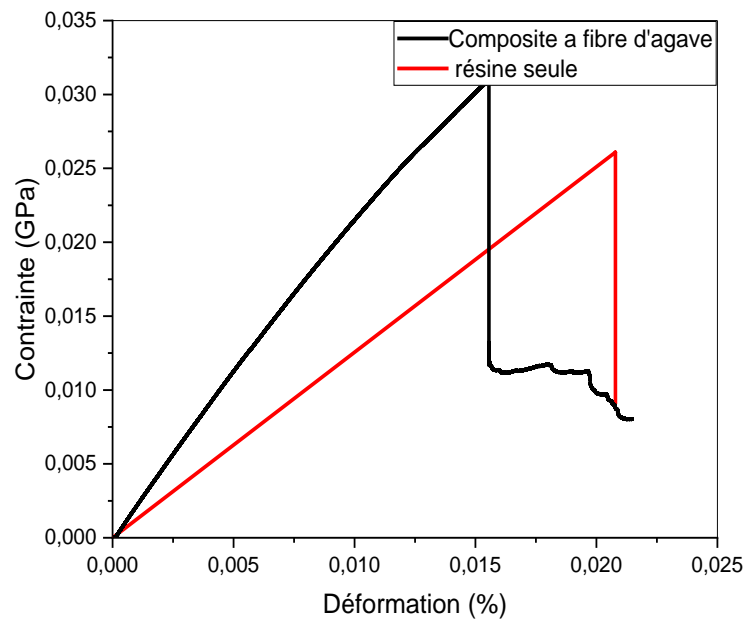


Fig.V.4 Courbes types (σ , ϵ) en traction de la résine seule et de composite à fibre d'agave

Cependant, Les composites renforcés par les fibres de Agave Americana, montrent un comportement linéaire élastique (Figure .V.4).

L'analyses de traction des composite a renforcé par des fibres alfa ont permis d'obtenir les principaux paramètres mécaniques dont la contrainte à la traction, le module d'Young et la déformation à la rupture, ces caractéristiques sont respectivement de $31,38 \pm 5,76$ MPa, $3,28 \pm 0,75$ GPa et $1,26 \pm 0,42$ %.

L'analyses de traction des composite a renforcé par des fibres Agave Americana ont permis d'obtenir les principaux paramètres mécaniques dont la contrainte à la traction, le module d'Young et la déformation à la rupture, ces caractéristiques sont respectivement de $39,71 \pm 10,4$ MPa, $5,28 \pm 1,55$ GPa et $1,26 \pm 0,42$ %.

Le comportement en traction de cette composite semble être gouverné par le comportement de fibre Agave Americana qui présentent individuellement un comportement également fragile (Figure.V.4) avec de déformations à la rupture de l'ordre de $\epsilon = 1,55 \pm 0,83$. De plus, la rupture de Ce composites, qui survient avec la rupture des fibres et à des contraintes nettement plus élevées à celles enregistrées lors de la déformation de la résine pure, dénote de la forte adhésion interfaciale des deux types de fibres avec la matrice polyester.

Le **Tableau V.1** indique les valeurs moyennes, de la déformation et la contrainte à la rupture et le module de Young des éprouvettes testées. La lecture de ce tableau montre d'une part que les propriétés mécaniques des composites sont améliorées par rapport au résine seule et d'autre part, l'effet des fibres sur les propriétés mécaniques est bien visible.

Tableau V.1 : Comparaison des propriétés mécaniques en **traction** des composites "Polyester /Alfa ", " Polyester /Agave Americana" avec celles des composites renforcés par des fibres unidirectionnelles citées dans la littérature.

D'après le **Tableau V.1**, il est clair que le matériau polyester/Alfa présente de bonne performance en termes de rigidité. En revanche, si on compare les contraintes à la rupture, il semble que le composite polyester/Agave présente la meilleure contrainte.

Il est remarquable de constater que les fibres d'Agave, utilisées comme renforts dans un matériau composite à matrice polyester, offre un grand taux de déformation à la rupture.

D'une façon générale, nos composites présentent des performances mécaniques acceptables comparées aux autres composites à fibres végétales comme Polyester/Sisal [11] et Polyester/Vakka [11].

Tableau V. 1 : Comparaison des propriétés mécaniques en **traction** des composites avec celles des composites renforcés par des fibres

Composite	Taux de fibre(%)	Contrainte (MPa)	Module de Young (Gpa)	Déformation à la rupture (%)
Polyester	0	26,08 ± 6,2	3,28 ± 0,75	1,26 ± 0,42
Polyester/ Alfa	21	31,38 ± 5,76	2,99±0,85	0,88±0,92
Polyester/Agave. Americana	23	39,71 ± 10,4	2,13±0,51	1,55±0,83
Polyester/Sisal [7]	32	100	15	1.2
Polyester/Lin [8]	26±0.4	134±12	16.0±0.1	1.7±0.1
Polyester/Elephant [9]	31.30	118.14	2.17	-
Polyester/Alfa [10]	21	26	2.88	1.2
Polyester/Sisal [11]	37.0	40.7	1.60	-
Polyester/Banana [11]	37.4	60.9	1.08	-
Polyester/Vakka [11]	37.2	66.0	1.79	-

V.2.2. Essai en flexion 3 point

Figure IV.5 et V.6 rassemblent les courbes typiques contrainte-déformation en flexion de la matrice Polyester et des deux composites " Polyester /Alfa", " Polyester /Agave Americana".

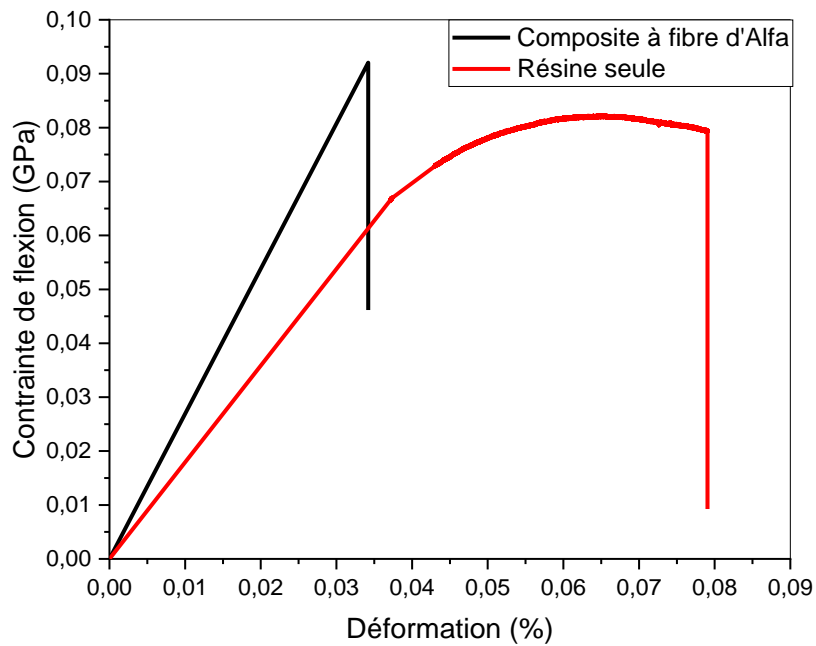


Fig.V.5 Courbes types (σ , ϵ) en flexion 3-points de la résine seule et de composite à fibre d'Alfa

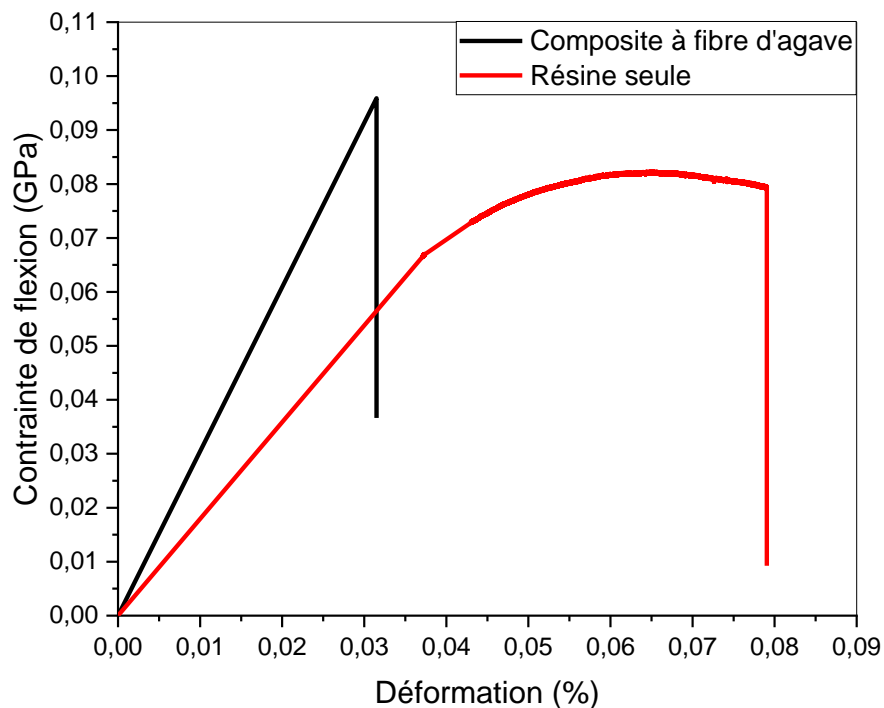


Fig.V.6 Courbes types (σ , ϵ) en flexion 3-points de la résine seule et de composite à fibre d'Agave

Les courbes en flexion trois points linéaire des deux composites "Polyester /Alfa" et "Polyester /Agave Americana" (Figure.V.6) illustre leur comportement fragile avec un contrainte de déformation à la rupture sont supérieures à celle de la matrice polyester, et peut atteindre des valeurs de $95.47 \pm 10,14$ et $108.7 \pm 15,2$ MPa, respectivement. La déformation à la rupture des composites est également supérieure à celle de la matrice polyester $82,31 \pm 12,3$

Le Tableau V.2 rassemble les valeurs moyennes avec l'écart type de la contrainte maximale en flexion, du module de Young et du taux de déformation pour la résine pure et des deux types de composites "Polyester /Alfa ", " Polyester /Agave Americana". Le nombre d'essais de flexion réalisés est de six pour la résine seule ainsi pour composites. Pour apprécier les caractéristiques mécaniques en flexion, nous avons rajouté dans ce tableau des résultats d'autres types de composites renforcés par des fibres unidirectionnelles cités dans la littérature.

On note que pour les propriétés de résistance, les deux types de fibres utilisées comme renfort dans la matrice en Polyester confère un gain significatif pour respectivement les composite, "Polyester /Alfa ", " Polyester /Agave Americana" (25 ; 09 %) et (114 ; 85 %) pour la contrainte maximale de flexion et le module de Young, respectivement. Cependant, on enregistre une très forte baisse sur le taux de la déformation de rupture par rapport à la résine pure de l'ordre de (71 et 73%) pour respectivement les deux composites "Polyester /Alfa "et " Polyester /Agave Americana.

Tableau.V.2 Comparaison des propriétés mécaniques en **flexion** des composites "Polyester /Alfa, Polyester /Agave Americana" avec celles des composites renforcés par des fibres unidirectionnelles citées dans la littérature.

Composite	Taux de fibre (%)	Contrainte (MPa)	Module de flexion (GPa)	Déformation à la rupture (%)
Polyester	0	82,31± 12,3	1,79± 0,32	6,49± 2,31
Polyester/ Alfa	21	95.47±2,32	2,45± 0,52	2,45± 0.52
Polyester/Agave. Americana	23	108.7±9,88	2,98 ±0,32	2,89 ±0.32
Polyester/Harakeke [12]	49	100	15	1.2
Polyester/Chanvre [13]	38±41	134±12	16.0±0.1	1.7±0.1
Polyester/Fique [14]	40	118.14	2.17	-
Polyester/Bambou traité [16]	48	26	2.88	1.2

D'après le [Tableau V.2](#), il est clair que le matériau polyester/Agave Americana présente la meilleure contrainte à la rupture et de bonne performance en termes de rigidité par rapport à polyester/Alfa

Il est remarquable de constater que la fibre de "Agave Americana" comme renfort de la matrice Polyester avec un taux de 24% offre des propriétés de résistance satisfaisantes avec un taux de déformation trois fois plus important que le composite Polyester /Fique contenant un important taux de fibres de Fique (40%).

Références

- [1] González MG, Baselga J, Cabanelas JC. Applications of FTIR on epoxy resins- identification, monitoring the curing process, phase separation and water uptake: INTECH Open Access Publisher, 2012.
- [2] Sathishkumar T, Navaneethakrishnan P, Shankar S, Rajasekar R. Characterization of new cellulose sansevieria ehrenbergii fibers for polymer composites. *Composite Interfaces*. 2013;20:575-93
- [3] Saravanakumar S, Kumaravel A, Nagarajan T, Sudhakar P, Baskaran R. Characterization of a novel natural cellulosic fiber from Prosopis juliflora hark *Carbohydrate polymers*. 2013;92:1928-33.
- [4] Fiore V, Scalici T, Valenza A. Characterization of a new natural fiber from *Arundo donax L* as potential reinforcement of polymer composites. *Carbohydrate polymers*. 2014;106:77-83.
- [5] Aucher J. Etude comparative du comportement composite à matrice thermoplastique ou thermodurcissable. Thèse de doctorat, INSA de Rouen: 2009.
- [6] Newman RH, Le Guen MJ, Battley MA, Carpenter JE. Failure mechanisms in composites reinforced with unidirectional Phormium leaf fibre. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2010;41:353-9.
- [7] Oksman K, Wallström L., Berglund I.. Morphology and mechanical properties of unidirectional sisal-epoxy composites. *Journal of Applied Polymer Science*. 2002;84:2358-65.
- [8] Martin N, Davies P, Baley C. Comparison of the properties of scutched flax and flax tow for composite material reinforcement. *Industrial Crops and Products*. 2014;61:284-92.
- [9] Rao KMM, Prasad AR, Babu MR, Rao KM, Gupta A. Tensile properties of elephant grass fiber reinforced polyester composites. *Journal of materials science*. 2007;42:3266-72.
- [10] Brahim SB, Cheikh RB. Influence of fibre orientation and volume fraction on the tensile properties of unidirectional Alfa-polyester composite. *Composites Science and Technology*. 2007;67:140-7
- [11] Rao KMM, Rao KM, Prasad AR. Fabrication and testing of natural fibre composites: Vakka, sisal, bamboo and banana. *Materials & Design*. 2010;31:508-13.

- [12] Le TM, Pickering KL. The potential of harakeke fibre as reinforcement in polymer matrix composites including modelling of long harakeke fibre composite strength. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2015;76:44-53.
- [13] Yousif B, Shalwan A, Chin C, Ming K. Flexural properties of treated and untreated kenaf/epoxy composites. *Materials & Design*. 2012;40:378-85.
- [14] Hoyos CG, Vázquez A. Flexural properties loss of unidirectional epoxy/fique composites immersed in water and alkaline medium for construction application. *Composites Part B: Engineering*. 2012;43:3120-30.
- [15] Sapuan S, Bachtiar D, Hamdan M. Flexural properties of alkaline treated sugar palm fibre reinforced epoxy composites. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering (JAME)*. 2010; 1:79-90.
- [16] Osorio L, Trujillo E, Van Vuure A, Verpoest I. Morphological aspects and mechanical Properties of single bamboo fibres and flexural characterization of bamboo/epoxy Composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 2011:0731684410397683.
- [17] Baley C. Analysis of the flax fibres tensile behaviour and analysis of the tensile stiffness increase. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2002;33:939-48.
- [18] Beakou A, Ntenga R, Lepetit J, Ateba J, Ayina L. Physico-chemical and microstructural characterization of "Rhectophyllum cunermense" plant fiber. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2008;39:67-74.
- [19] Azwa Z, Yousif B, Manalo A, Karumasena W. A review on the degradability of polymeric composites based on natural fibres. *Materials & Design*. 2013;47:424-42

Conclusion Général

&

Perspectives

Conclusion générale & perspectives

L'ajout de fibres *d'Alfa* ou bien d'*Agave Americana* dans une résine polymère représente une technique prometteuse car elle permet l'amélioration de l'ensemble des propriétés du matériau. C'est dans ce contexte que ce travail de mémoire a été entrepris dont les principales conclusions sont :

- La méthode proposée pour l'extraction des deux types de fibres Alfa (*Stipa Tenacissima*) et *Agave Americana* par rouissage, montre que c'est une technique simple et économique et elle permet de produire d'excellente qualité de fibres longues. De plus, elle offre l'avantage de ne pas faire appel à des produits chimiques.

Les différentes caractérisations physico-chimiques et l'étude du comportement mécanique en traction réalisées sur ces deux types de fibres font ressortir les principaux résultats suivants:

- les résultats obtenues à partir de l'analyse ATR-FTIR confirment que les fibres *Agave Americana* et Alfa sont très riches en cellulose.

D'après les essais de traction effectués sur les deux types de fibres végétales, les propriétés de traction obtenues sur la single fibre sont :

- Pour la fibre d'*Agave*, la contrainte maximale $228,97 \pm 47,76$ MPa module de Young $4,83 \pm 1,027$ GPa; et une déformation $20,26 \pm 5,32$ % et la fibre d'Alfa la contrainte maximale $269,17 \pm 70,32$ MPa module de Young $14,875 \pm 8,6$ GPa et déformation $1,77 \pm 0,52$ %

La fibre de "Alfa" (*Stipa Tenacissima*) offre en moyenne le meilleur module de Young, la meilleure contrainte à la rupture et une petite déformation à la rupture. Il est remarquable que la fibre "*Agave americana*" possède la plus grande déformation à la rupture.

- Vu la dispersion observée des résultats expérimentaux, nous avons entamé une étude statistique des propriétés mécaniques pour apporter une estimation probable du comportement fragile de ces fibres végétales, basée sur la distributions de Weibull à deux paramètres, il a permis une approximation raisonnable des données expérimentales.
- D'après les différents essais (traction, flexion 3-points statique), le rajout des fibres d'Alfa et d'*Agave Americana* dans une matrice polyester permet d'améliorer les caractéristiques mécaniques du composite : résistance à la traction, module de Young, et résistance à la flexion.
- le matériau polyester/*Agave Americana* présente la meilleure contrainte à la rupture et de bonne performance en termes de rigidité par rapport à polyester/Alfa.