



Département de Génie Mécanique

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du diplôme de :

MASTER

En Génie Mécanique

Option : Fabrication mécanique et productive

Présenté par :

BOURAS Youcef & KORICHI Farid

Thème

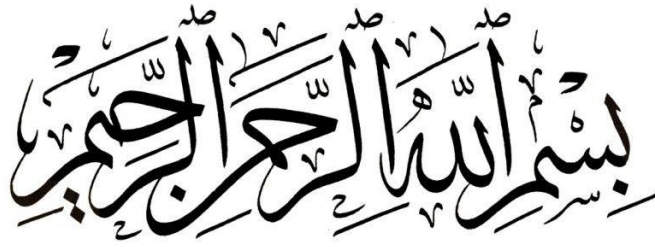
Développement d'un matériau
composite à base de fibres d'Alfa

Devant le jury composé de :

NOM et Prénom	Grade	Qualité
Saib Cherif	MCA	Président
Slamani Mohamed	Prof	Encadreur
Mansour Rokbi	MCA	Co- Encadreur
Zeggane Houari	MCB	Examineur





Année Universitaire : 2020 / 2021

N° d'ordre : GM/...../2020



Dédicaces

Je dédie ce travail :

-  *A mon cher père et ma chère mère.*
-  *A mes chers frères et sœurs.*
-  *A toute ma famille.*
-  *A tous ceux qui ont sacrifié leur temps pour la science et à tous ceux qui utilisent la science pour le bien et la prospérité de l'humanité.*

Remerciements

Premièrement, nous remercions Dieu Tout-Puissant pour son aide et son assistance dans la réalisation de ce mémorandum et deuxièmement, nous remercions le père, la mère, le frère et l'ami de nous avoir donné tout ce qui est nécessaire jusqu'à ce que nous ayons atteint ce degré de connaissance, et nous remercions également l'Université Muhammad Boudiaf comme un tout, y compris le professeur, le médecin et le professeur pour nous enseigner et nous enseigner afin que nous devenions valables, efficaces et dans l'ordre Nous donnons également une valeur ajoutée.

Sommaire

Introduction générale.....	1
Chapitre I : Généralité sur les matériaux composites	
I.1 Introduction.....	5
I.2 Définition de matériau composite	5
I.2.1 Grande diffusion.....	5
I.2.2 Hautes performances	5
I.3 Les constituants	5
I.3.1 Le renfort	6
I.3.1.1 Architecture des renforts	6
I.3.1.2 Caractéristiques moyennes des fibres et renforts	10
I.3.2. La matrice	10
I.3.3. Les charges et les additifs	11
I.3.3.1 les charges	11
I.3.3.2 Les additifs	12
I.4 Procédés d'élaborations	12
I.4.1 Moulage au contact	12
I.4.2 Moulage par projection simultanée	12
I.4.3 Moulage sous vide	13
I.4.4 Moulage par projection de résine	14
I.4.5 Moulage par centrifugation	14
I.5 Structure des matériaux composites	14
I.5.1 Les monocouches:	14
I.5.2 Les Stratifiés.....	15
I.5.3 Sandwichs:	15
I.6. Les domaines d'utilisation:.....	16
I.7 La loi de mélange pour les composites stratifiés	16
I.8 Conclusion	17

Sommaire

CHPITRE II :Généralités sur les fibres naturelles

II.1 Introduction	19
II.2 Les fibres naturelles	19
II.2.1 Définition	19
II.2.2 Classification des fibres naturelles	19
II.3 Les fibres végétales	20
II.3.1 Définition des fibres végétales	20
II.3.2 Classification des fibres végétales	20
II.3.3 Structure de la fibre végétale	21
II.3.4 Composition chimique de la fibre végétale	22
II.3.5 Caractéristiques physiques et mécaniques des fibres végétales	24
II.4 Différentes fibres végétales	25
II.4.1 L'abaca	25
II.4.2 Le lin	26
II.4.3 Le chanvre	26
II.4.4 Le coton	27
II.4.5 Le Kenaf	28
II.4.6 Le jute	29
II.4.7 Le sisal	29
II.4.8 La ramie	30
II.4.9 Le coco	31
II.4.10 L'alfa	32
II.4.11 Palmier dattier	32
II.5 Avantages et inconvénients	32
II.6 Perspectives d'avenir alfa	33
II.7 Conclusion	35

Sommaire

Chapitre III Matériaux utilisés et techniques expérimentales

III.1. Introduction	37
III.2. Matériaux utilisés	37
III.3. Caractéristiques principales pour chaque matériau utilisé	37
III.3.1. Résine polyester	37
III.3.1.2. Caractéristiques des résines polyester	37
III.3.1.3. Avantages et inconvénients de l'utilisation de la résine polyester	38
III.4. la plante d'alfa	38
III.4.1. L'extraction de la plante alfa	39
III.4.2. Extraction des fibres	39
III.4.2.1. Rouissage dans l'eau	39
III.4.2.2. Brossage de la tige	39
III.4.2.3. Etuvage des fibres	40
III.4.2.4. Traitement alcalin L'hydroxyde de sodium	40
III.4.2.5. Rinçage de l'eau distillée.	41
III.4.2.6. Séchage à l'ambiante (24H) et Etuvage à 60°	41
III.5. Tissage	41
III.6. La mise en œuvre du bio-composite	42
III.6.1. La technique de moulage utilisée	42
III.7. Préparation de l'éprouvette	42
III.8. Conclusion	44

Chapitre IV Résultats et discussions

IV.1. Introduction	
IV.2. Comportement mécanique	46
IV.3. Caractérisations mécaniques	47
IV.3.1. Analyse des courbes contrainte-déformation de bio composite	47
IV.3.1.1. Essai de traction bio composite	47

Sommaire

IV.3.1.2 Caractérisation mécanique en traction des bio composites	48
IV .4 Analyse et résultat des éprouvettes en traction	49
IV.5 Allongement à la rupture	50
IV.6 Conclusion	52

Liste des figures

Listes des figures

Figure chapitre I

Figure (I.1): Matériau composite.....	5
Figure (I.2) : Types de renfort.....	6
Figure (I.3): renforts unidirectionnels (UD).....	7
Figure (I.4): renforts Toile ou taffetas.....	7
Figure (I-5): renforts Serge.....	7
Figure (I.6): renforts Satin.....	8
Figure (I.7): Principe du procédé de fabrication des fibres de carbone	8
Figure (I-8): Fibre de verre	9
Figure (I-9): Fibre d'aramide	9
Figure (I-10) : Différentes familles de matrice	10
Figure (I-11): Principe du moulage au contact	12
Figure (I-12) : Principe du moulage par projection simultanée.....	13
Figure (I-13) : Moulage sous vide	13
Figure (I-14) : Principe de moulage par injection de résine.	14
Figure (I-15) : Principe de moulage par centrifugation	14
Figure (I-16) : Composite monocouche.	15
Figure (I.17): Plaque stratifiée.....	15
Figure (I-18): Composite sandwich.....	16
Figure (I-19): Modélisation par un système de ressorts des propriétés en traction d'un composite stratifié.....	17

Figure chapitre II

Figure .II.1. Classification des fibres naturelles selon l'origine_Alfa	20
Figure. II.2. Structure de la fibre végétale	22
Figure. II.3. Modèle de la description de structure d'une fibre végétale	22
Figure .II.4. Exemple de représentation schématique de l'agencement des différents composants des fibres végétales à l'échelle micrométrique	24
Figure .II.5. Fibre de l'abaca	25

Liste des figures

Figure .II.6. Fibre de lin.....	26
Figure .II.7. Fibre de chanvre	27
Figure .II.8. Fibre de coton	28
Figure .II.9. Fibre de le kénaf	28
Figure. II.10. Fibre de jute	29
Figure. II.11. Fibre de Sisal	29
Figure. II.12. Fibre de ramie	31
Figure .II.13. Fibre de coco	31
Figure .II.14. Fibre d'alfa	32
Figure. II.15. Fibre de palmier dattier.....	32
Figure. II.16 Toile de <u>d'alfa</u>	34

Figure chapitre III

Figure.III.1. Cycle de polymérisation de polyester.	38
Figure III.2 : Les fibres d'alfa.	39
Figure III.3 Brossage de la tige	40
Figure III.4 Séchage a l'aire libre	40
Figure III.5 Etuvage des fibres à 70C°.....	40
Figure III.6 Fibre alfa non traité	40
Figure. III.7 Traitement alcalin	41
Figure III.8 Etuvage des fibrs	41
Figure III.9 Tissge des fibres	42
Figure. III.10 : mécanisme de moulage sous vide	42
Figure.III.10 : Les dimensions des éprouvettes. (ASTM3039)	43
Figure.III.11 : Schéma de principe de la Machine d'essai de traction.....	44
Figure.III.12 : Eprouvette soumis à la traction	44

Liste des figures

Figure chapitre IV

Figure IV.1: Comportement mécanique en traction des fibres unitaires d'alfa	47
Figure IV.2 : diagrammes allongement sous contrainte traité 1	49
Figure IV.3: diagramme allongement sous contrainte non traité 1	49
Figure IV.4: Paramètres de traction des éprouvettes testées (Charge maximale) Eprouvette traité 1, et non traité 3.	50
Figure IV.5: diagramme allongement sous contrainte traité 1	51
Figure IV.6 : diagrammes allongement sous contrainte traité 2	51

Liste des tableaux

Listes des tableaux

Tableau (I-2) : Les avantages et les inconvénients du moulage sous vide.....	13
Tableau (I-1) : Les caractéristiques moyennes des fibres et renforts	10
Tableau.II.1. Composition chimique (en %) de différentes fibres végétales	23
Tableau.II.2. Les caractéristiques mécaniques de quelques fibres Végétales.....	25
Tableau.III.1. Différentes caractéristiques de la résine polyester.....	38
Tableau.III.2. Avantages et inconvénients de la résine polyester.....	38
Tableau III.3. Différentes caractéristiques de L'hydroxyde de sodium.....	40
Tableau IV.1 : allongement sous contrainte traité 1	48
Tableau IV.2 : allongement sous contrainte non traité 1	49
Tableau IV.3 : allongement sous contrainte traité 1	50
Tableau IV.4 allongement sous contrainte traité 2.....	51

Introduction

générale

Introduction générale

De nos jours, les matériaux composites ont connu une évolution très remarquable. Ils ne cessent d'évoluer et gagner une importance, d'ailleurs, ils s'imposent dans beaucoup de domaines, par exemple, l'industrie automobile, l'aéronautique, l'industrie militaire, etc. ...

Vu les exigences toujours croissantes du consommateur, le domaine des matériaux composites se trouve immédiatement concerné, d'où la nécessité de développer des nouveaux produits qui répondent à ces exigences.

L'objectif d'un matériau composite est de combiner deux ou plusieurs matériaux tout en créant une synergie entre ces différents matériaux afin qu'il en résulte un composite plus performant que chacune des composantes prises individuellement.

L'alfa est principalement utilisé pour la fabrication de cordages, et dans l'artisanat. Les tissus, les sacs en toile de Halfa tissée sont largement utilisés pour le transport et le stockage de produits agricoles, . Avec la croissance de la manutention en vrac et des matériaux d'emballage synthétiques bon marché, le marché de ces matériaux d'alfa traditionnels a été sérieusement affecté.

L'exploitation et l'utilisation de l'Alfa paraissent remonter à la plus haute antiquité. Cependant, l'essor véritable de l'Alfa en tant que plante industrielle de large utilisation date de la fin du XIXe siècle lorsque, grâce au procédé Routledge, les papeteries écossaises purent l'utiliser comme matière première pour la fabrication de la pâte à papier. La plante présente un intérêt écologique et économique puisqu'elle n'a pas besoin d'insecticides ni de pesticides nocifs à l'environnement et elle consomme très peu d'eau. En plus, l'Alfa joue un rôle important dans la lutte contre la désertification et l'érosion

C'est dans ce contexte qu'entre notre contribution. Le renfort utilisé dans notre travail est les fibre d'alfa pour élaborer des matériaux composites alfa/époxy.

Ce mémoire est subdivisé en quatre chapitres :

Le premier chapitre est réservé aux généralités sur les matériaux composites, ses éléments constitutants, les différents procédés de mise en forme, ensuite leur domaine d'utilisations.

Le deuxième chapitre est des généralités sur les fibres végétales, classification des fibres végétales, Caractéristiques des fibres végétales. Le troisième chapitre donne les détails sur les matériaux utilisés et les procédés d'élaboration de ces matériaux. Nous avons présenté aussi l'essai traction pour déterminer les caractéristiques de ces matériaux.

Le dernier chapitre est consacré à la présentation et la discussion des propriétés mécaniques des bio-composites et l'influence de l'architecteurs du tissage sur ces caractéristiques.

Introduction générale

Cette étude est achevée par une conclusion générale résumant les principaux résultats obtenus et donnant quelques perspectives à cette étude.

Chapitre I :
Généralité sur
les matériaux
composites

I.1 Introduction :

Les matériaux composites sont des matériaux à hautes performances mécaniques, façonnables à volonté au gré du concepteur et donc doué d'un potentiel illimité.

Les matériaux composites se développent aujourd'hui dans pratiquement tous les domaines et sont à l'origine de formidables challenges dans diverses réalisations de haute technologie [1]

I.2 Définition de matériau composite :

Un matériau composite est constitué de l'assemblage de deux matériaux de natures différentes, se complétant et permettant d'aboutir à un matériau dont l'ensemble des performances est supérieur à celui des composants pris séparément.

On distingue deux types de composites [1][2]:

I.2.1 Grande diffusion :

Les matériaux composites à grande diffusion offrent des avantages essentiels, qui sont :

Optimisation des coûts par diminution des prix de revient, sa composition de polyester avec des fibres de verre longues ou courtes (sous forme de mat ou tissu) et la simplicité du principe des matériaux (moulage par contact, SMC et injection).

I.2.2 Hautes performances :

Les matériaux composites à hautes performances sont utilisés dans le domaine d'aéronautique où le besoin d'une grande performance déduite des hautes valeurs ajoutées. Les renforts sont plutôt des fibres longues. Le taux de renfort est supérieur à 50%.

Ces composites sont élaborés par les procédures suivantes :

- drapage autoclave, enroulement filamentaire, RTM.
- beaucoup de procédés encore manuels.

I.3 Les constituants :

En général les constituants principaux d'un matériau composite sont :

- La matrice.
- Le renfort.
- Les charges et les additifs.

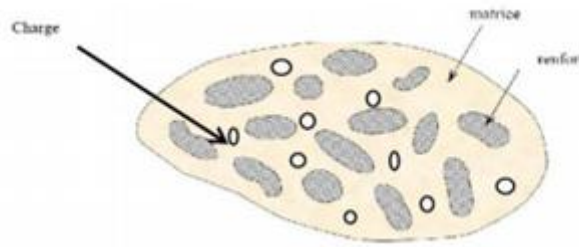


Figure (I.1): Matériau composite [1].

I.3.1 Le renfort :

Les renforts assurent les propriétés mécaniques du matériau composite et un grand nombre de fibres sont disponibles sur le marché en fonction des coûts de revient recherchés pour la structure réalisée. Les renforts constitués de fibres se présentent sous les formes suivantes :

- Linéique (fils, mèches)
- Tissus surfaciques (tissus, mats)
- Multidirectionnelle (tresse, tissus complexes, tissage tri directionnel ou plus).

La classification des types de renforts couramment rencontrés est indiquée sur la figure 1[3].

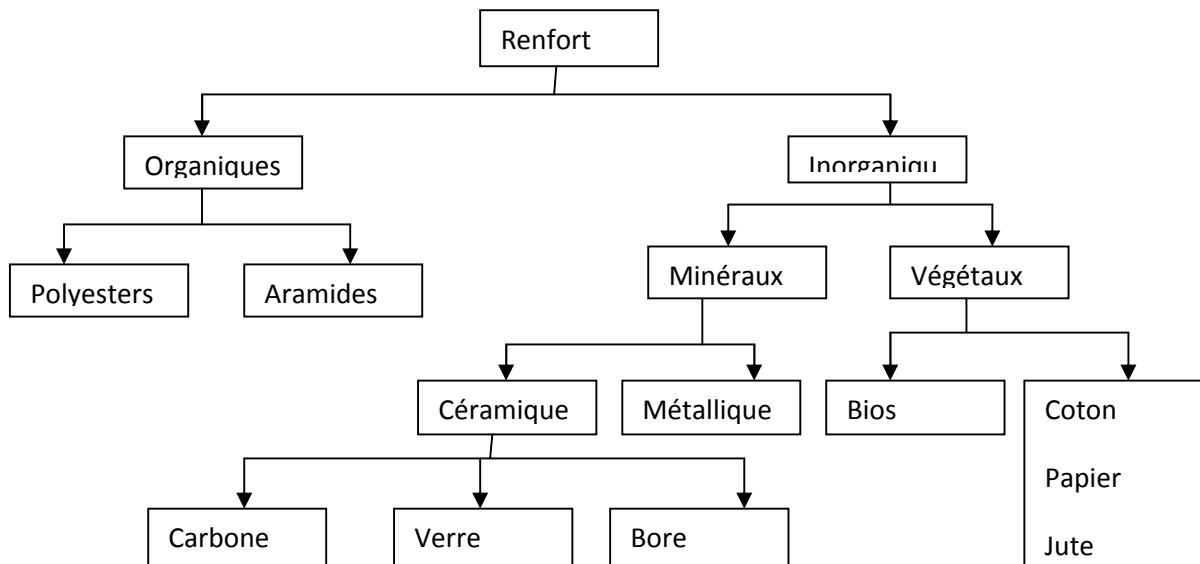


Figure (I.2) : Types de renfort [3].

I.3.1.1 Architecture des renforts [4] :

Il existe différentes géométries et textures de renforts

➤ Les unidirectionnels (UD) :

Dans une nappe UD, les fibres sont assemblées parallèlement les unes par rapport aux autres à l'aide d'une trame très légère. Taux de déséquilibre très grand.

Les tissus se composent de fils de chaîne et de trames perpendiculaires entre eux. Le mode d'entrecroisement ou armure les caractérise.

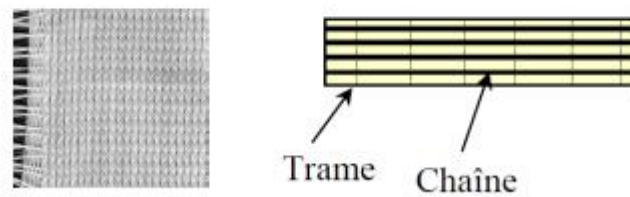


Figure (I.3): renforts unidirectionnels (UD).

Toile ou taffetas :

Chaque fil de chaîne passe dessus puis dessous chaque fil de trame, et réciproquement. 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 embuvage important et réduisent les propriétés mécaniques.

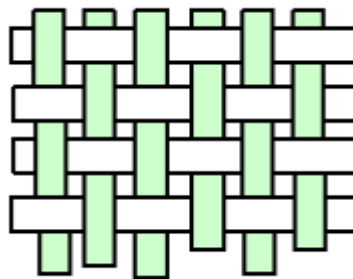


Figure (I.4): renforts Toile ou taffetas.

➤ **Serge :**

Chaque fil de chaîne flotte au-dessus de plusieurs (n) fils de trame et chaque fil de trame flotte au-dessus de (m) fils de chaîne. Armure de plus grande souplesse que le taffetas ayant une bonne densité de fils. Ci-contre, un sergé 2/2.

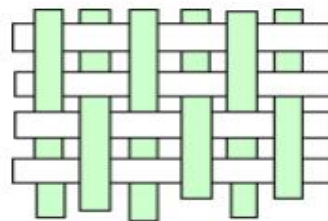


Figure (I-5): renforts Serge

➤ **Satin :**

Chaque fil de chaîne flotte au-dessus de plusieurs (n-1) fils de trame et réciproquement. Ces tissus ont des aspects différents de chaque côté. Ces tissus sont assez souples et adaptés à la mise en forme de pièces à surfaces complexes. Ce type de tissu présente une forte masse spécifique.

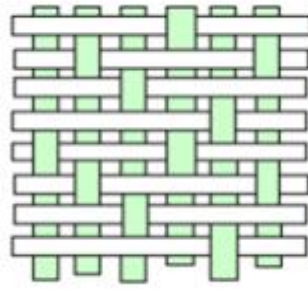


Figure (I.6): renforts Satin.

❖ On distingue plusieurs natures de fibre :

a) **Fibre de carbone**

C'est la fibre la plus utilisée dans les applications hautes performances. Elle est obtenue par carbonisation de la fibre de PAN (Polyacrylonitrile). Selon la température de combustion, on distingue deux types de fibres :

- Fibres haute résistance (HR) : pour une combustion de 1000 à 1500 °C ;
- Fibres haut module (HM) : pour une température de combustion de 1800 à 2000 °C.

➤ **Fabrication des fibres de carbone :**

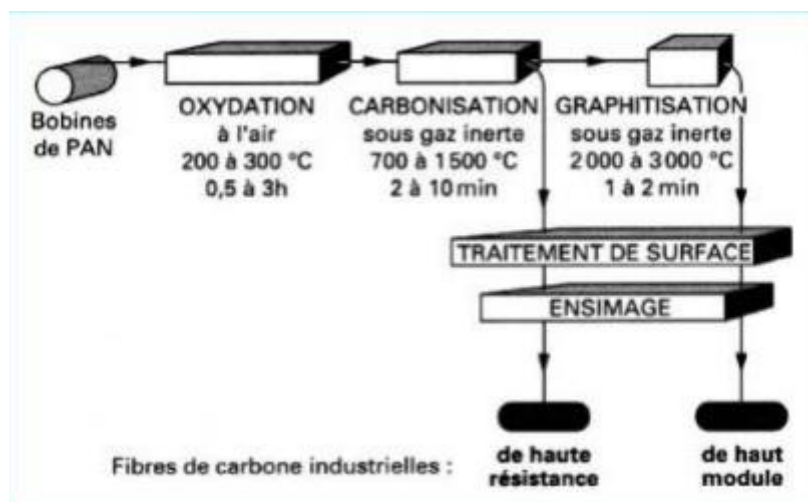


Figure (I.7): Principe du procédé de fabrication des fibres de carbone.

b) **Fibre de verre**

Elle constitue le renfort essentiel des composites de grande diffusion. Elle est obtenue à partir de sable (silice) et d'additifs (alumine, carbonate de chaux, magnésie, oxyde de bore). On distingue trois types de fibres [4] :

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).



Figure (I-8): Fibre de verre

c) Fibre d'aramide

Souvent appelée KEVLAR®, la fibre d'aramide est issue de la chimie des polyamides aromatiques. Il est possible de trouver deux types de fibres d'aramide de rigidités différentes :

- La fibre basse module : utilisées pour les câbles et les gilets pare-balles
- La fibre haute module : employées dans le renforcement pour les composites hautes performances.



Figure (I-9): Fibre d'aramide

d) Fibre de bore

Fibres de haut module et insensibles à l'oxydation à hautes températures, elles sont obtenues par dépôt en phase gazeuse sur un substrat en tungstène.

e) Fibre de silice (ou de quartz)

Elles sont produites comme le verre, par fusion, et sont essentiellement utilisées pour leur haute tenue chimique et thermique dans les tuyères pour moteur de fusée.

f) Fibres de polyéthylène de haut module

Elles présentent une très bonne résistance à la traction mais une mauvaise mouillabilité. Pour des structures peu sollicités, on peut encore utiliser des fibres synthétiques courantes de polyamide ou polyester.

I.3.1.2 Caractéristiques moyennes des fibres et renforts

Renforts	Diamètre du filament (µm)	Masse volumique (kg.m ⁻³)	Module d'élasticité longitudinal (Mpa)	Module de cisaillement (Mpa)	Coefficient de Poisson	Contrainte de rupture (traction) MPa	Allongement à rupture %	Coefficient de dilatation thermique °C ⁻¹
	d	?	E	G	?	s _r	A	a
Verre E	16	2 600	74 000	30 000	0,25	2 500	3,5	0,5*10 ⁻³
Verre R	10	2 500	86 000		0,2	3 200	4	0,3*10 ⁻³
Carbone HM	6.5	1 800	390 000	20 000	0,35	2 500	0,6	0,08*10 ⁻³
Carbone HR	7	1 750	230 000	50 000	0,3	3 200	1,3	0,02*10 ⁻³
Kevlar 49	12	1 450	130 000	12 000	0,4	2 900	2,3	-0,2*10 ⁻³
Bore	100	2 600	400 000			3 400	0,8	0,4*10 ⁻³
Silicate d'alumine	10	2 600	200 000			3 000	1,5	
Polyéthylène		960	100 000			3 000		

Tableau (I-1) : Les caractéristiques moyennes des fibres et renforts

I.3.2. La matrice :

La matrice est l'élément qui lie et maintient les fibres. Elle répartit les efforts (résistance à la compression ou à la flexion) et assure la protection chimique des fibres.

La classification des types de matrices couramment rencontrées est donnée sur la figure (I-10)

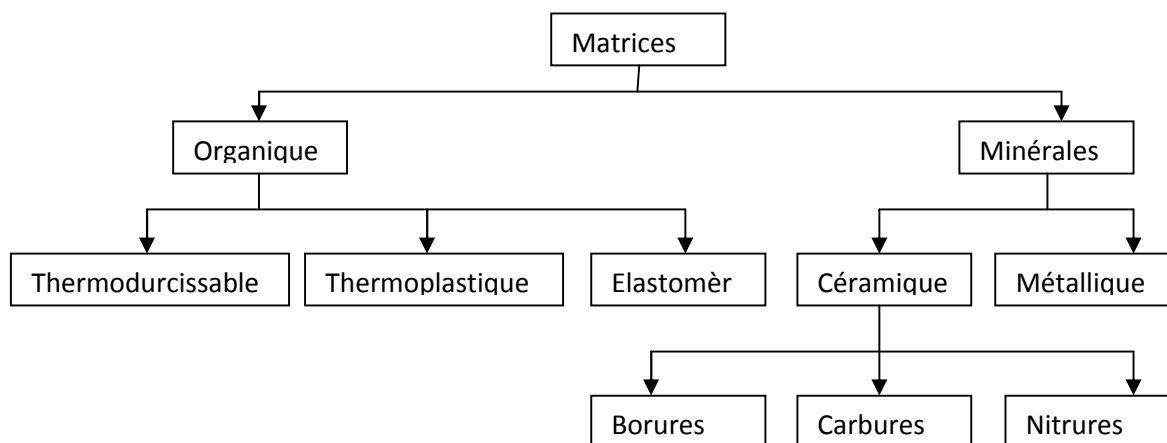


Figure (I-10) : Différentes familles de matrice [3].

Les résines les plus employées dans les matériaux composites sont les résines thermodurcissables et les résines thermoplastiques

a) - Résines thermodurcissables

Les résines thermodurcissables ont des propriétés mécaniques élevées (traitement thermique ou physico-chimique). Ces résines ont donc la particularité de ne pouvoir être mises en forme qu'une seule fois. Les principales résines thermodurcissables utilisées

dans la mise en œuvre des matériaux composites sont par ordre décroissant en tonnage : les résines polyesters insaturées, les résines de condensation, les résines époxydes.

a) -1- Les résines époxydes [1]

Les résines les plus utilisées après les résines polyesters insaturées sont les résines époxydes.

Elles ne représentent cependant que 5 % du marché composite, à cause de leur prix élevé (de l'ordre de cinq fois plus que celui des résines polyesters) [1].

Du fait de leurs bonnes caractéristiques mécaniques, les résines époxydes, généralement utilisées sans charges, sont les matrices des composites à hautes performances (constructions aéronautiques, espace, missiles, etc.).

Les caractéristiques mécaniques générales des résines époxydes sont les suivantes :

- ❖ Masse volumique 1100 à 1500 kg/m³
- ❖ Module d'élasticité en traction 3 à 5 GPa
- ❖ Contrainte à la rupture en traction 60 à 80 MPa
- ❖ Contrainte à la rupture en flexion 100 à 150 MPa
- ❖ Allongement à la rupture 2 à 5 %
- ❖ Résistance au cisaillement 30 à 50 MPa
- ❖ Température de fléchissement sous charge 290 °C

b) Résines thermoplastiques

Ce sont des polymères pouvant être alternativement ramollis par chauffage et durcis par refroidissement dans un intervalle de température spécifique du polymère étudié. Les résines thermoplastiques présentent l'aptitude à l'état ramolli, de se mouler aisément par plasticité [1].

c) Résines thermostables

Ce sont des polymères présentant des caractéristiques mécaniques stables sous des pressions et des températures élevées (>200°C) appliquées de façon continue. Cette propriété est mesurée en déterminant la température que peut supporter la résine durant 2000h sans perdre la moitié de ses caractéristiques mécaniques. [1]

I.3.3. Les charges et les additifs :

I.3.3.1 les charges: [1]

❖ Charges renforçantes

L'objet de l'incorporation de charges renforçantes est d'améliorer les caractéristiques mécaniques de la résine. Ces charges peuvent être classées suivant leur forme géométrique en

- Charges sphériques
- Charges non sphériques

❖ Charges non renforçantes :

Les charges non renforçantes ont pour rôle soit de diminuer le coût des résines en conservant les performances des résines, soit d'améliorer certaines propriétés des résines.

Parmi ces classes on trouve :

- Charges de faible coût.

- Charges ignifugeantes.
- Charges conductrices et antistatiques

I.3.3.2 Les additifs :

Les additifs se trouvent en faible quantité (quelques % et moins) et interviennent comme :

- Lubrifiants et agents de démoulage,
- Pigments et colorants,
- Agents anti-retrait,
- Agents anti-ultraviolets

I.4 Procédés d'élaborations :

La plupart des méthodes de mise en œuvre consistent à élaborer les pièces en matériaux composites par couches successives comportant matrice et renfort .[1]

I.4.1 Moulage au contact:[4]

Principe

Procédé manuel pour la réalisation de pièces à partir de résines thermodurcissables, à température ambiante et sans pression. Les renforts sont déposés sur le moule et imprégnés de résine liquide, accélérée et catalysée. Après durcissement de la résine, la pièce est démoulée et détournée.

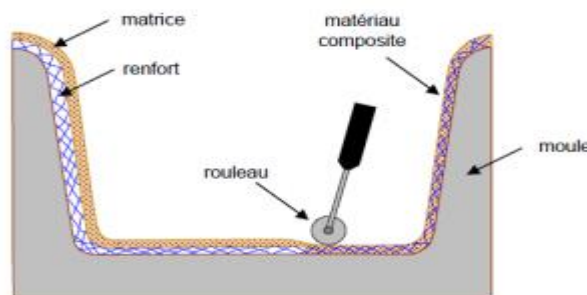


Figure (I-11): Principe du moulage au contact [1]

I.4.2 Moulage par projection simultanée :

Principe [4]

Procédé manuel ou robotisé permettant la réalisation de pièces à partir de résines thermodurcissables à température ambiante et sans pression. Les matières premières sont mises en œuvre à l'aide d'une machine dite "de projection" comprenant :

- Un dispositif de coupe - projection du renfort (fibre)
- Un ou deux pistolets projetant simultanément la résine

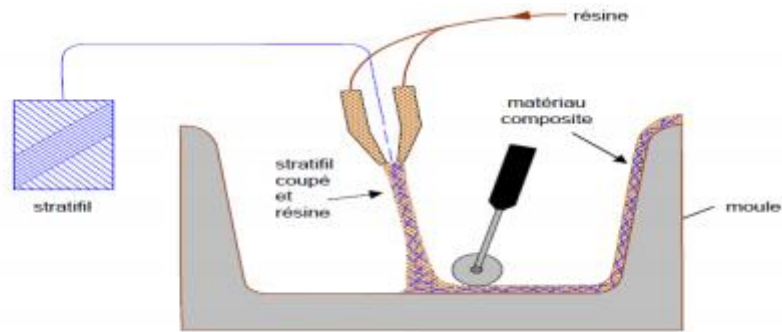


Figure (I-12) : Principe du moulage par projection simultanée.

I.4.3 Moulage sous vide:

Principe [4]

Le moulage sous vide s’effectue entre moule et contre moule rigide, semi-rigide ou souple suivant la technologie de mise en œuvre.

Le renfort est placé à l’intérieur du moule ; la résine catalysée est versée sur le renfort. On utilise la pression qui s’exerce sur le moule lors de la mise sous vide pour répartir la résine et imprégner le renfort.

La résine peut également être injectée par l’aspiration consécutive au vide.

Le tableau suivant représente les avantages et les inconvénients du moulage sous vide :

Avantages	Limites
<ul style="list-style-type: none"> - Deux faces lisses éventuellement gel-coatés. - Qualité constante - Bonne cadence de production - Nécessite peu de surface - Investissement très modéré (moule, pompes à vide) - Bonnes conditions de travail et d’hygiène. 	<ul style="list-style-type: none"> - Possibilité de forme plus réduite qu’au contact - Mise au point parfois difficile.

Tableau (I-2) : Les avantages et les inconvénients du moulage sous vide

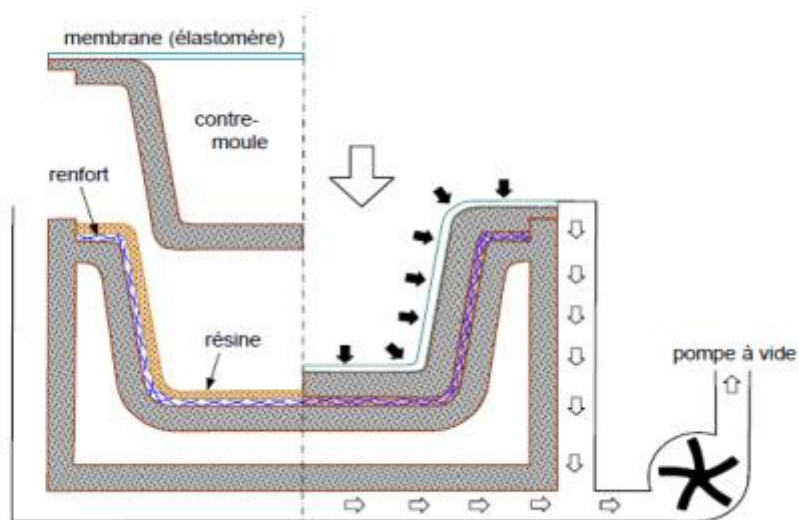


Figure (I-13) : Moulage sous vide [1]

I.4.4 Moulage par projection de résine :

Principe :

Le moulage par injection de résine RTM (Résine Transfert Molding). Une nappe de fibre (tissus, mats) est déposée dans un moule fermé étanche et la résine est injectée à basse pression.

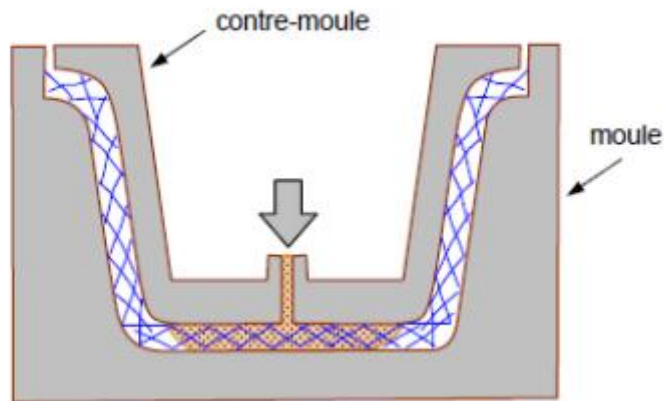


Figure (I-14) : Principe de moulage par injection de résine.[1]

I.4.5 Moulage par centrifugation:

Principe : [4]

Procédé de moulage limité aux enveloppes cylindriques. Le renfort (fibres longues coupées) et la résine sont déposés dans un moule cylindrique chauffé tournant à grande Vitesse.

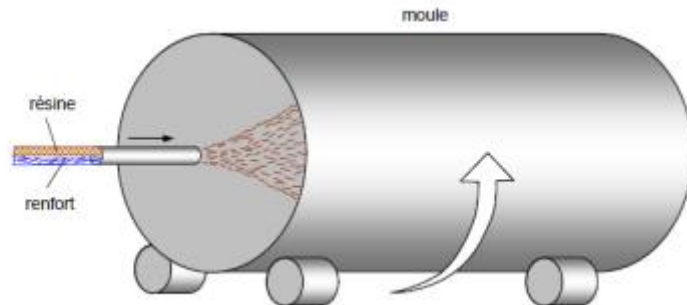


Figure (I-15) : Principe de moulage par centrifugation [1].

I.5 Structure des matériaux composites :

Les structures des matériaux composites peuvent être classées en trois types

- Les monocouches
- Les stratifiées
- Les sandwichs

I.5.1 Les monocouches:

Les monocouches sont les éléments de base des structures composites. Des fibres unidirectionnelles placées dans le plan médian sont emprisonnées dans une matrice polymère.

Ils sont caractérisés par le type de renfort utilisé : des fibres longues (unidirectionnelles ou non), courtes, sous forme de tissus, de rubans [6]

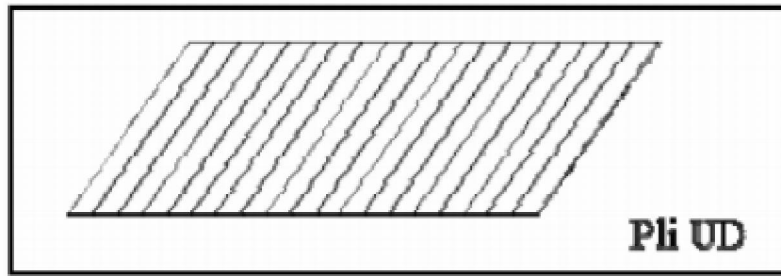


Figure (I-16) : Composite monocouche.

I.5.2 Les Stratifiés :

On appelle stratifié un matériau composé d'un ensemble ordonné de couches d'orientation et d'épaisseur données, constituées de divers matériaux (figure I-17). Une couche d'un stratifié est souvent appelée une strate. Le type de stratifié est défini généralement par sa séquence d'empilement, information qui fournit de manière synthétique l'orientation des diverses couches d'un stratifié. L'avantage que présentent les composites stratifiés est de permettre de créer des matériaux aux propriétés mécaniques orientées de manière optimale afin de mieux répondre aux sollicitations de la structure [5]

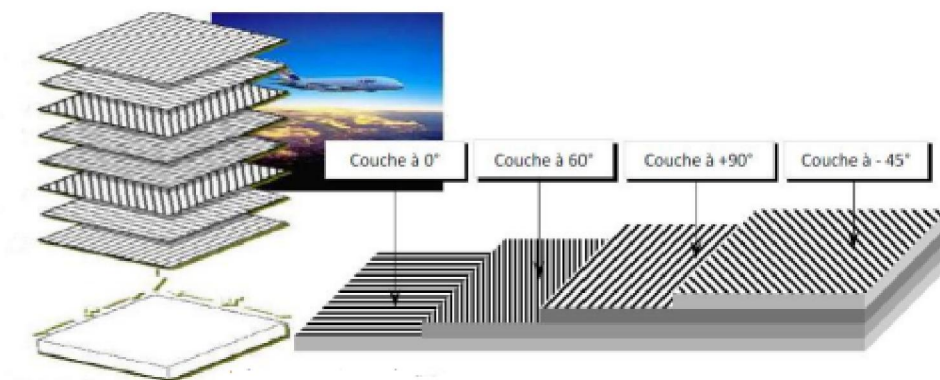


Figure (I.17): Plaque stratifiée.

I.5.3 Sandwichs:

Les structures composites subissant des sollicitations de type flexion ou torsion sont généralement construites en matériaux sandwichs. Une structure sandwich est composée d'une âme et de deux peaux en matériaux composites. L'assemblage est réalisé par collage à l'aide d'une résine compatible avec les matériaux en présence. Les âmes les plus utilisées sont de type nid d'abeilles, âme ondulée ou mousse. Les peaux sont généralement constituées de structures stratifiées. Une âme nid d'abeilles est présentée sur la figure II.1 2.

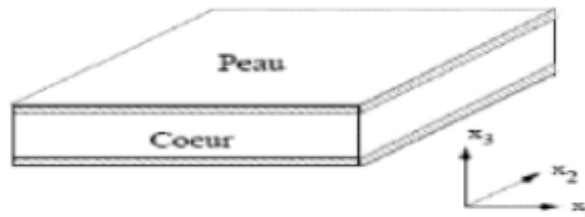


Figure (I-18): Composite sandwich.

I.6. Les domaines d'utilisation:

Les matériaux composites de nos jours prennent une place prépondérante dans différents domaines :

- Électricité et électronique,
- Bâtiment et travaux publics,
- Transports routiers, ferroviaires, maritimes, aériens et spatiaux (notamment militaire,)
- Santé (instrumentation médicale).[6]

I.7 La loi de mélange pour les composites stratifiés :

Les déformations des matériaux homogènes et isotropiques peuvent être décrites assez simplement à l'aide des modules d'élasticité et des contraintes de déformation, qui sont les propriétés de base des matériaux bruts. Dans le cas des composites, chaque élément joue un rôle différent et c'est l'association de ces propriétés qui confère au matériau final ses caractéristiques propres. Bien que ces caractéristiques finales soient le résultat d'interactions complexes entre le renfort et la matrice, il est possible d'en donner une estimation simple à l'aide de la Loi des Mélanges [7] appliquée aux composites stratifiés :

$$Pc = \rho_c * V_c = \rho_f * Vf + \rho_m * Vm \quad \text{où } (Vf + Vm) = 1 \dots \dots (I-1)$$

Avec :

- Vf = fraction volumique de fibres
- Vm = fraction volumique de matrice
- Pc = poids estimé du composite
- ρ_f = masse volumique de la fibre
- ρ_m = masse volumique de la matrice

Il s'agit de valeurs théoriques, en réalité la présence de vides fait que $Vf + Vm \leq 1$. Par exemple, le module d'élasticité en traction peut être estimé en se basant sur les modules respectifs de la fibre et de la matrice. Cette équation peut être modélisée par un système de ressorts associés en parallèle Figure (I-13).

$$Ec = Ef * Vf + Em * Vm \dots \dots \dots (I-2)$$

Avec :

- E_c = module d'élasticité en traction estimé du composite
- E_f = module d'élasticité en traction de la fibre
- E_m = module d'élasticité en traction de la matrice
- V_f = fraction volumique de fibres
- V_m = fraction volumique de matrice

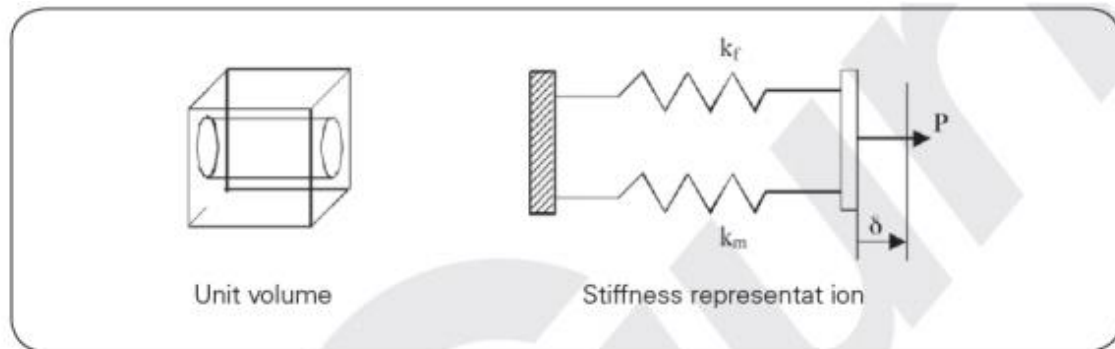


Figure (I-19): Modélisation par un système de ressorts des propriétés en traction d'un composite stratifié.

I. 8. Conclusion :

La présente description nous permettra de donner une idée générale sur les matériaux composites.

Les matériaux composites disposent d'atouts importants par rapport aux matériaux traditionnels. Ils apportent de nombreux avantages fonctionnels : légèreté, résistance mécanique et chimique, maintenance réduite, liberté de formes. Ils permettent d'augmenter la durée de vie de certains équipements grâce à leurs propriétés mécaniques et chimiques. Ils contribuent au renforcement de la sécurité grâce à une meilleure tenue aux chocs et au feu. Ils offrent une meilleure isolation thermique ou phonique et, pour certains d'entre eux, une bonne isolation électrique.

CHPITRE II :

Généralités sur les fibres naturelles

II.1 Introduction

Depuis l'Antiquité, l'homme a élaboré des matériaux composites par combinaison de matières de natures différentes dans le but d'obtenir des matériaux aux propriétés spécifiques.

De nombreux matériaux naturels lui ont fourni des modèles, tel que l'os rigide mais léger, formé de fibres de collagène dans une matrice minérale d'apatite dure et fragile, ou le bois, souple mais résistant formée d'un réseau de micro fibrille de cellulose cimentée dans une matrice d'hémicellulose et lignine.[8.9]

La famille des matériaux composites à fibres, apparue dans les années 1940 n'a cessé de se développer en raison de leurs propriétés mécaniques associées souvent à une faible densité. Leur bon rapport coût/performance leur a ouvert une très large gamme d'application Dans des domaines varies ; l'industrie aérosatial, automobile, maritime, ferroviaire, le bâtiment, l'ameublement, la décoration etc [10].

Toutefois, même si le développement des composites est qualifié de prometteur cette progression est néanmoins jalonné de quelque contrainte à surmonter dont par exemple celles liées à l'environnement, l'hygiène et la sécurité.

La valorisation des matériaux composites classiques avec leur armature en fibres de verre, d'aramide, ou bien de carbone pose un grand problème à leur fin de vie. Pour y palier les fibres naturelles sont mises.

Elles sont issues de ressources renouvelables elles sont biodégradables. Elles sont moins irritantes pour la peau et le système respiratoire des personnes qui les manipulent. Par ailleurs les fibres naturelles ont une densité plus faible que les fibres minérales [11 .12].

II.2 Les fibres naturelles

II.2.1 Définition :

Les fibres naturelles sont des substances filamenteuses issues de végétaux et d'animaux, susceptibles d'être filées pour fabriquer des fils et des cordes. Elles sont tissées, tricotées ou tressées pour confectionner des textiles indispensables à la société [13] .

II.2.2 Classification des fibres naturelles :

Les fibres naturelles sont pour la plupart d'origine végétale, animale et minérale.

- **Végétale** : extraite de plantes, de fruit et d'arbres comme le coton, le lin, l'agave, le jute, le chanvre, etc.
- **Animale** : extraites de poil d'animaux comme le mouton, la chèvre, le lama, etc.
- **Minérale** : on trouve dans la nature des minéraux dont la texture fibreuse. il s'agit d'une matière toxique, comme l'amiante [4] .

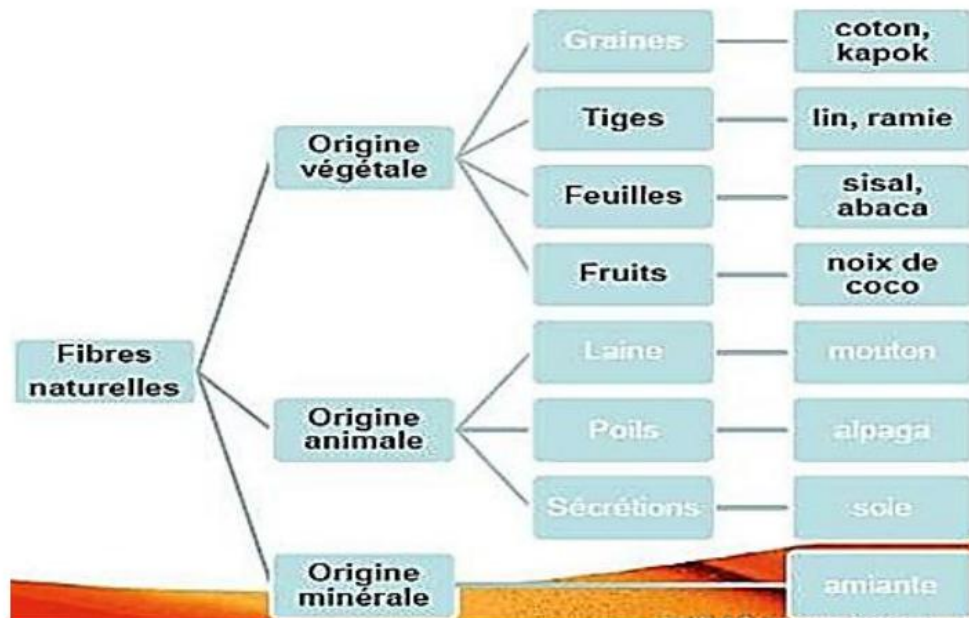


Figure (II.1) : Classification des fibres naturelles selon l'origine. Alfa

II.3 Les fibres végétales :

II.3.1 Définition des fibres végétales :

Les fibres végétales sont des structures biologiques fibrillaires composées de cellulose, hémicelluloses et de lignine. En proportion relativement faible d'extractibles non azoté, de matière protéique brute, de lipide et de matières minérales. Les proportions de ces constituants dépendent énormément de l'espèce, de l'âge et des organes de la plante[14] .

II.3.2 Classification des fibres végétales :

Les fibres végétales sont classées en quatre groupes suivant leur provenance à savoir : les fibres de feuille, de tiges, de bois et de surface.

- **Les fibres de feuilles :**

Ces fibres sont obtenues grâce au rejet des plantes monocotylédones. Les fibres sont fabriquées par chevauchement de paquet qui entoure le long des feuilles pour les renforcer ces fibres sont dures et rigides les types de fibres de feuilles les plus cultivées sont la fibre de sisal, d'abaca et fibre d'alfa.

- **Les fibres de tiges :**

Les fibres de tige sont obtenues dans les tiges des plantes dicotylédones. Elles ont pour rôle de donner une bonne rigidité aux tiges de plantes. Les fibres de tige sont commercialisées sous forme de paquet de cor et en toute longueur. Les fibres de tige les plus utilisées sont les fibres de jute, de lin, de ramie, de kenaf, et de chanvre.

• **Les fibres de bois :**

Les fibres de bois proviennent du broyage des arbres tels que les bambous ou les roseaux. Elles sont généralement courtes.

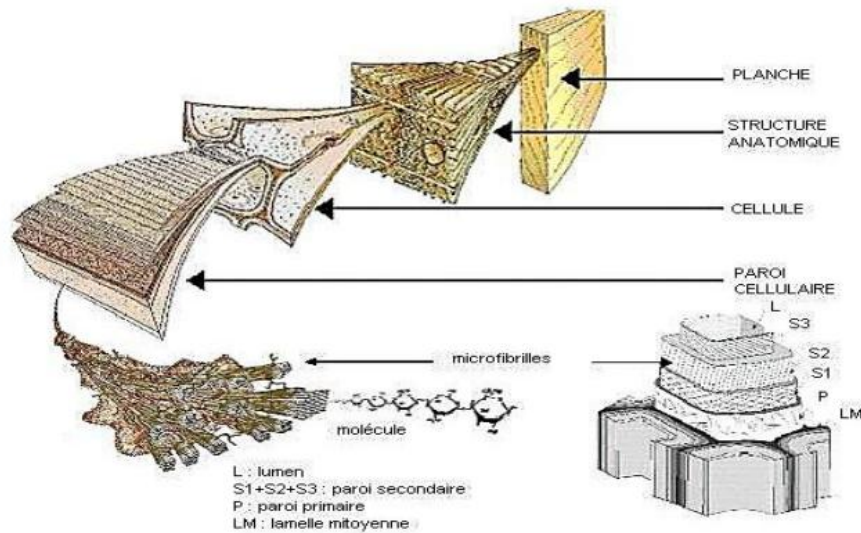
• **Les fibres de surface :**

Les fibres de surface entourent en général la surface de la tige, de fruits ou de grains. Les fibres de surface des grains constituent le groupe le plus important dans cette famille de fibres. Nous citons entre autres le coton et la noix de coco.

II.3.3 Structure de la fibre végétale :

La fibre végétale est un composite en elle-même. Le renfort est constitué par les couches de micro fibrille celluloses en partie cristalline. Ce dernier est enrobé d'une matrice polysaccharidique amorphe (hémicellulose et pectine) qui est associée par liaison hydrogène et covalentes à la lignine. La fibre végétale est composée de plusieurs parois parallèles à l'axe de la fibre et disposée en couche superposée dans le sens radiale. Ces différentes couches qui forment la lamelle mitoyenne, la paroi primaire et la paroi secondaire.

Ces dernières bordent un lumen de diamètre variable suivant l'espèce. La paroi secondaire est composée de trois couches de micro fibrilles (S1, S2, S3) (Fig. II. 2) .[14]



Figure(II.2) : Structure de la fibre végétale

Les micros-fibrilles décrivent par rapport à l'axe de la fibre, un angle microfibrillaire dont la valeur varie d'une espèce à l'autre. L'orientation du microfibrilles par rapport à l'axe de la cellule joue un grand rôle dans les propriétés mécaniques des parois des fibres, plus quel'angle des micros fibrilles augmente, le module d'Young (une mesure de la rigidité) décroît, tandis que l'extensibilité des parois augment [14].

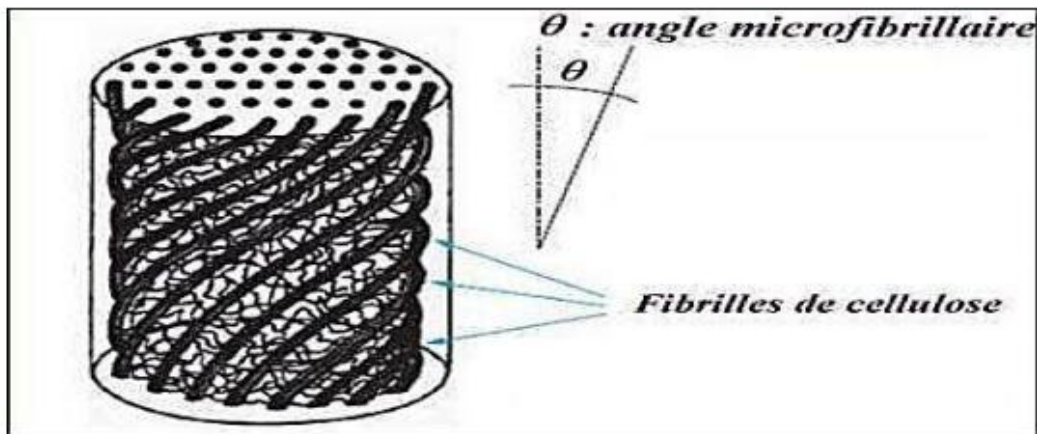


Figure (II.3) : Modèle de la description de structure d'une fibre végétale

II.3.4 Composition chimique de la fibre végétale :

Les différents constituants des fibres végétales (Figure II.4) sont :

- ❖ **La Cellulose** : La cellulose est le principal composant dans la quasi-totalité des fibres végétales et représente la matière la plus abondante sur la surface de la terre (plus de 50 % de la biomasse)[15].

C'est un polymère naturel du premier plan. Généralement, les fibres végétales sont constituées par une chaîne des fibres en cellulose [11].

- ❖ **Hémicellulose** : Les hémicelluloses représentent le 3^{ème} composant principal juste après la cellulose et la lignine, avec une proportion en poids à peu près 25% de la biomasse. L'hémicellulose présente dans toutes les parois de ces fibres. C'est le constituant responsable de l'élasticité des fibres [11].
- ❖ **Lignine** : La lignine forme avec la cellulose et l'hémicellulose la grande majorité de la biomasse, elle est 2^{ème} après la cellulose en termes d'abondance. Ses principales fonctions sont d'apporter de la rigidité, une imperméabilité à l'eau et une grande résistance à la décomposition (barrière de protection biologique)[14]. La lignine constitue la colle qui lie les fibres végétales entre elles ainsi que leurs parois. C'est un polymère tridimensionnel [11].
- ❖ **Pectines** : Les pectines jouent un rôle capital dans l'architecture de la paroi végétale. Ces substances pectiques sont présentes avec des proportions variées dans la plupart des végétaux (environ 1% dans le bois)[14].
- ❖ **Extractibles** : Ce sont des molécules de faible masse molaire qui remplissent la lumière des cellules. Ils représentent 2 à 5 % de la masse sèche. La plupart de ces extractibles sont solubles dans l'eau ou des solvants organiques [14].

Le tableau II.1 illustre la composition chimique (en %) de différentes fibres végétales

Fibres	Cellulose	Hémicelluloses	Lignine	Pectine	Cire
Coton	85-90	5,7	0,7-1,6	0-1	0,6
Lin	71	18,6-20,6	2,2	2,3	1,7
Chanvre	70-74	17,9-22,4	3,7- 5,7	0,9	0,8
Jute	61,1-71,5	13,6-20,4	12-13	0,2	0,5
Ramie	68,6-76,2	13,1-16,7	0,6-0,7	1,9	0,3
Sisal	66-78	10-14	10-14	10	2
Coco	32-43	0,15-0,25	40-45	3-4	-
Alfa	45	24	24	5	2

Tableau (II.1) : Composition chimique (en %) de différentes fibres végétales

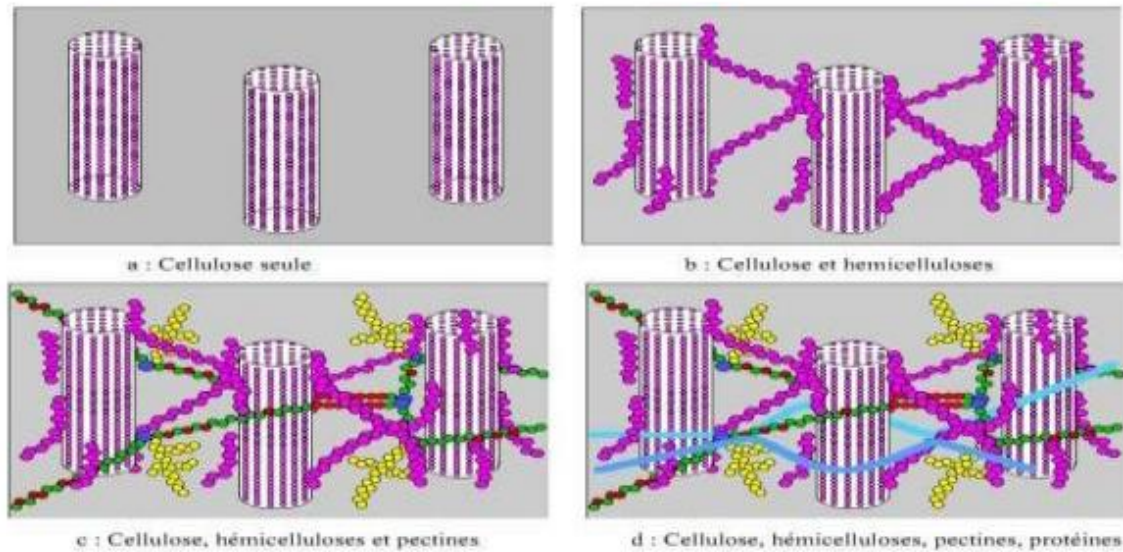


Figure (II.4) : Exemple de représentation schématique de l'agencement des différents composants des fibres végétales à l'échelle micrométrique

II.3.5 Caractéristiques physiques et mécaniques des fibres végétales :

Généralement une fibre végétale est caractérisée physiquement par son diamètre sa densité et son teneur en eau et son pourcentage d'absorption d'eau. Et elle est caractérisée mécaniquement par sa résistance à la traction, son élongation à la rupture et son module d'élasticité [11]. Le tableau (II.2) représente les caractéristiques mécaniques de quelques fibres végétales.

Fibre	Densité (g/cm ³)	Module de traction (GPa)	Résistance en Traction (MPa)	Allongement (%)
Lin	1,5	28	345-1100	2.7-3.2
Jute	1.45	13-27	350-550	1,2-2,5
Chanvre	1,48	29-70	550-900	1,6-3,5
Ramie	1,5	20-70	550-900	1,6-4
kénaf	1,47	6-8	1580	2,7
Abaca	1,35	20	900	3,5
Sisal	1,45	9-20	400-700	2-14
Coco	1,15	4-6	130-120	15-40
Coton	1,5	5-12	300-800	3-10

Tableau (II.2) : Les caractéristiques mécaniques de quelques fibres Végétales.

II.4 Différentes fibres végétales :

Les fibres végétales sont de plus en plus utilisées comme renfort dans les matériaux de constructions. Elles constituent en effet une ressource renouvelable, naturellement biodégradable, et disposant de nombreuses qualités mécaniques et hydriques.

Les plus utilisées sont les fibres libériennes, comme le Kenaf, le jute, la ramie, le palmier et surtout le chanvre et le lin [15].

II.4.1 L’abaca :

L'abaca ou chanvre de manille est un bananier textile(Musacées) qui pousse aux philippines: les fibres dans les gaines foliaires forment un pseudotrunc très recherché pour la fabrication de cordages légers et insubmersibles, et aussi de rabanes, nappes, stores, vêtements [16] (Fig. II.5).



Figure (II.5) : Fibre de l'abaca

II.4.2 Le lin :

Le lin est une plante annuelle qui pousse dans le monde entier, aussi bien en Asie qu'en Europe. La fibre de lin vient des tiges de la plante mais aussi de l'huile extraite des graines(Figure II.6). L'avantage de cette fibre est sa longueur élevée, en moyenne 25 mm et sa bonne résistance. Le lin peut être utilisé comme substitut au coton.Cette fibre est utilisée pour fabriquer des papiers fins comme les papiers à cigarette ou le papier bible.



Figure (II.6) : Fibre de lin

Les fibres du lin permettent de faire des cordes, du tissu, ou plus récemment des charges isolantes pour des matériaux de construction. Les graines sont utilisées pour produire de l'huile de lin pour l'industrie de l'encre et de la peinture, pour la consommation humaine et animale, à cause de sa richesse en oméga 3. Le lin est une des rares fibres textiles végétales européennes. Elle a la particularité d'être une fibre longue (plusieurs dizaines de centimètres), par rapport aux fibres courtes (coton, chanvre) ou moyennes (laine)

II.4.3 Le chanvre :

Le chanvre est une fibre libérienne, tout comme le lin, le Kenaf, le jute et la ramie. Les plantes de cette famille présentent toutes des fibres externes longues et étroites et des fibres internes ligneuses(Figure II.7). Par ses possibilités techniques, la fibre de chanvre répond à des besoins textiles traditionnels tout en ouvrant la voie à une foule d'innovations. Cultivé dans les pays à climat tempéré, on en trouve dans l'est de l'Europe, en France et en Italie. La France est le premier producteur en Europe pour la production de chanvre, Les fibres libériennes sont généralement transformées en textiles (tapis et vêtements) et en produits industriels comme des géotextiles, de la

toile anti-érosion, du renfort de composite et dur emplissage ce qui constitue d'ailleurs le principal emploi actuel et à venir de la fibre de chanvre. A cause de sa grande solidité et de son intérêt économique. Ses caractéristiques physiques lui confèrent une grande force, ainsi qu'une excellente rentabilité dans le domaine des composites et du papier.



Figure (II.7) :Fibre de chanvre

Le chanvre est originaire d'Asie centrale mais on trouve sa trace en Chine 5000 ans avant JC. Au tour du bassin méditerranéen sa culture a été prospère pendant plusieurs siècles.

On l'utilise pour faire des toiles de maison, des cordages maritimes, des vêtements et plus tard du papier.

II.4.4 Le coton :

Le cotonnier est un petit arbuste annuel de 1 à 1,50 m de haut (Figure II.8). Il est cultivé dans les zones chaudes d'Amérique, d'Afrique, d'Asie et mêmes d'Europe (Espagne). Les fibres de coton proviennent des graines, et sont appelés linters. Cette fibre est utilisée pour ses bonnes caractéristiques physique et mécanique. Elle est utilisée pour des papiers dits de luxe.

Elles sont également utilisées pour les papiers fiduciaires et principalement pour les billets de banques, papiers pour lesquels la caractéristique essentielle est la résistance au pliage.



Figure (II.8) :Fibre de coton

II.4.5 Le Kenaf :

Le Kenaf est une plante herbacée dont la tige peut atteindre 3 m de haut. Il se trouve principalement dans les régions tropicales et en Amérique du sud. Elle est destinée uniquement pour le domaine papetier. La longueur moyenne des fibres (1,5 mm) est comprise entre celle des fibres de feuillus et celle des fibres de résineux(Fig.II.9).



Figure (II.9) :Fibre de le kénaf

Le Kenaf porte de nombreux nomsautour du monde :chanvre de Deccan, chanvre de Bombay, chanvre de Guinée, Po kaeo...

Cette plante ne supporte pas le gel, on la trouve dans les régions tropicales et subtropicales. Africaine d'origine, elle est cultivée aussi en Asie et en Amérique du Sud, là où les conditions climatiques lui conviennent.

II.4. 6. Le jute :

Le jute est une plante buissonnante originaire du sud-est asiatique. Les principaux producteurs sont l'Inde et le Bangladesh. Les fibres utilisées en papeterie sont les déchets de culture et de filature. La longueur moyenne des fibres est de 2 mm, avec une largeur de 20 μm . Les caractéristiques de ces fibres sont généralement assimilées à celles du kénaf (Figure II.10)



Figure (II.10) : Fibre de jute

Le jute (deux espèces cultivées, *Corchorusolitorius* L., et *C. capsularis* L., Tiliaceae, "chanvre du bengale ") est fortement lignifié, robuste, sert à fabriquer des sacs solides (pour le charbon, les pommes de terre), et des semelles d'espadrilles.

II.4.7 Le sisal ;

Le sisal est une plante vivace constituée par une rosette de grandes feuilles à section triangulaire allant jusqu'à 2m de long (Figure II.12). Il s'agit d'une plante tropicale, principalement cultivé en Amérique du sud et en Afrique. La longueur moyenne de ces fibres est de 3 mm. (La figure II.12) représente la fibre de jute.



Figure (II.11) : Fibre de Sisal

Le sisal provient d'un agave originaire du Mexique dont les feuilles possèdent de longues fibres très résistantes utilisées pour la fabrication de cordages, tissus grossiers, tapis, sacs et autres objets artisanaux ou à usage domestique, destinés le plus souvent à l'exportation. Il s'agit d'une plante tropicale, principalement cultivé en Amérique du sud et en Afrique. Le Sud Malgacheest une zone de culture de cette plante. Les conditions climatiques font que ces fibres de sisal sont bien classées sur le marché international des fibres dures.

Son nom provient de la ville de Sisal, située dans l'état mexicain du Yucatán. C'est à partir du port de Sisal qu'étaient expédiées les fibres dans le monde entier. Elle était jusque dans les années 1970 bien connue des agriculteurs européens sous forme de ficelle servant à lier les bottes de foin. Elle a, depuis l'apparition des presses à bottes haute densité, été remplacée par de la ficelle en polypropylène.

Actuellement encore, les mouvements scouts et éclaireurs utilisent beaucoup ce t type de ficelle pour assembler les constructions du mobilier de camp, assemblage selon la méthode Froissart où niclous ni vis ne sont utilisés.

Elle est également utilisée dans la fabrication des cibles traditionnelles de jeu de fléchettes ou de tir à l'arc. On l'utilise également pour fabriquer des disques de polissage. Elle trouve aussi son utilité dans le bâtiment (construction), en effet les fibres de cette plante sont utilisées comment stabilisateurs (par armature) dans le béton de terre (terre crue).

Le sisal peut être teint et on le trouve parfois associé à d'autres fibres végétales. Il absorbe l'humidité des pièces dans lequel il se trouve. Il convient particulièrement aux chambres. Très doux, le tissage du sisal est très agréable.

Les Aztèques savaient déjà utiliser le sisal pour en faire du papier, du fil à coudre, des cordes, des nattes et des chaussures

II.4. 8 La ramie :

La ramie est une plante arbustive. Originaire d'Asie de l'Est, la ramie a pour principaux producteurs la Chine, le Japon et l'Amérique. La longueur moyenne des fibres est comprise entre 40 et 250 mm, pour un diamètre moyen de 45 µm. Ces fibres ressemblentaux fibres de lin maisont encore plus

longues, plussolides et plus rigides (la figure II.12) représente fibre de ramie.



Figure (II.12) :Fibre de ramie

Les fibres des tiges de la ramie (*Boehmerianivea* (L.) Gandisch, Urticaceae, "ortie de Chine") sont constituées de cellulose quasi pure de très bonne qualité et utilisées pour le tissage et la fabrication de papiers résistants. Les fibres sont longues (50 à 250 mm), très solides (un fil ne peut être cassé à la main), imputrescibles, brillantes de sorte que les étoffes rappellent la soie et ont été qualifiées de "soie végétale".

II.4.9 Le coco :

Les fibres de coco proviennent de la couche fibreuse qui entoure la noix de coco. Elles sont filées et tissées après avoir été assouplies dans l'eau(Fig. II.13). Le filage grossier et irrégulier donne au coco un aspect rustique. Le coco est très résistant, il est isolant, imputrescible et antibactérien. On utilise plutôt dans des pièces spacieuses et lorsqu'on veut mettre en avant son côté rustique.



Figure (II.13) : Fibre de coco

II.4.10 L'alfa :

L'alfa, *Stipa tenacissima* L., est une plante herbacée (Graminées) d'Afrique du Nord et d'Espagne (ou spart) utilisée pour la fabrication de cordages, d'espadrilles, de tissus grossiers, de papier, tapis, paniers. D'une façon générale, la fabrication d'objets en fibres végétales se nomme sparterie.



Figure (II.14) : Fibre d'alfa

II.4.11 Palmier dattier :

Le palmier dattier se constitue principalement de 10 parties à savoir : les palmes, la jeune palme, le régime de dattes, les dattes, le gourmand, Le stipe, les cicatrices annulaires, le rejet, le bulbe, les racines [17]. (Figure II.15) illustre la fibre de palmier dattier.



Figure (II.15) : Fibre de palmier dattier.

II.5 Avantages et inconvénients :

Avantage :

- ✓ Faible cout.

- ✓ Propriétés mécaniques spécifiques importants (résistance et rigidité).
- ✓ Biodégradabilité.
- ✓ Non abrasif pour les outillages.
- ✓ Neutre pour l'émission de co2.
- ✓ Demande peu d'énergie pour être produite.
- ✓ Pas de résidus après incinération.
- ✓ Pas d'irritation cutanée lors de la manipulation des fibres.
- ✓ Bonne isolation thermique et acoustique.
- ✓ Ressource renouvelable

Inconvénients :

- ✓ Absorption d'eau.
- ✓ Faible stabilité dimensionnelle.
- ✓ Biodégradabilité.
- ✓ Faible tenu thermique (20 à 30°C max).
- ✓ Fibres anisotropes.
- ✓ Variation de qualité en fonction du lieu de croissance, de la météo.
- ✓ Pour des applications industrielles demande la gestion d'un stock.

II.6 Perspectives d'avenir alfa :

Dans le contexte écologique actuel, les actions en faveur de l'éco-conception amènent les industriels à étudier et intégrer les fibres naturelles pour leurs performances mécaniques et leur renouvelabilité.

Deuxième fibre naturelle la plus produite au monde derrière le coton, le jute pousse principalement dans le golfe du Bengale : plus de 90% de la production de cette fibre se répartit entre le Bangladesh et l'état indien limitrophe du Bengale occidental. Malheureusement la plupart des applications du jute aujourd'hui restent à faible valeur ajoutée (sacs, géotextiles, tapis, etc.) et souffrent de la concurrence des matières synthétiques. Les utilisations du jute sont en plein essor dans le monde entier car le secteur manufacturier s'intéresse de plus en plus aux matières biodégradables respectueuses de l'environnement qui peuvent se substituer aux matières synthétiques. Cependant les producteurs de jute et le secteur de transformation n'ont guère innové en matière de production et de transformation.

En utilisation continue, le sac de jute perd de sa force et donc sa capacité à stocker des produits est diminuée, en quel cas il est considéré comme un déchet et généralement disposé comme poubelle ou brûlé. Ces deux modes d'élimination contribuent à pollution locale et émission de gaz à effet de serre responsables pour le réchauffement climatique. La possibilité d'utiliser le tissu de toile de jute, même en état effiloché, serait une solution environnementale appropriée. Une telle méthode est de utiliser ce tissu de jute, en pourcentage limité, comme renfort dans une matrice de polymère appropriée, qui peut être forte et assez rigide pour rivaliser avec les produits en bois et autres matériaux conventionnels pour la construction et le mobilier. En conséquence, le coût du composite dépendrait plus de la résine polymère utilisée comme matrice que sur les déchets de tissu de jute. En conséquence, recyclés les plastiques peuvent être utilisés comme matrice pour réduire les coûts environnementaux composites appropriés.



Figure (II.16) : Toile de d'alfa

II.7 Conclusion :

Les fibres naturelles présentent de nombreux avantages (faible coût, ressource renouvelable, biodégradabilité, propriétés mécaniques spécifiques importantes (résistance et rigidité). Comme tous les produits naturels, les propriétés mécaniques et physiques des fibres naturelles varient considérablement. Ces propriétés sont gouvernées par la composition chimique et structurale et dépendent du type de la fibre. La cellulose, le composant principal de toutes les fibres végétales, varie d'une fibre à une autre.

Chapitre III

**Matériaux utilisé et
technique
expérimentales**

III.1. Introduction

L'utilisation croissante des matériaux composites engendre des problèmes de gestion des déchets qui en résultent. On s'oriente alors de plus en plus vers la mise en œuvre de produits biodégradables, soit en ayant recours à des polymères biodégradables, soit en incorporant des fibres biodégradables dans des matériaux polymériques. Cette dernière nécessite dans la plupart des cas une étape de comptabilisation par traitement chimique des constituants, afin d'améliorer l'adhésion entre la matrice et le renfort qui est notre but principal.

Nous avons réalisé la partie essentielle de notre travail qui est le traitement chimique alcalin sur les tissus de alfa et l'élaboration de quelques composites avec le moulage sous vide.

III.2 .Matériaux utilisés :

Les matériaux utilisés pour ce travail sont :

- Dans la vaste étendue des fibres végétale, nous avons opté pour la fibre d'Halfa. La plante utilisée est issue des steppes Algérienne, dans la région de ZRAIGAT BOUSAADA wilaya de Msila. Elle a été récoltée en printemps au mois d'Avril 2021.
- -Résine polyester insaturée comme matrice (fournie par labo de moulage université de M'sila).
- -Hydroxyde de sodium (NaOH).

III.3. Caractéristiques principales pour chaque matériau utilisé :

III.3.1. Résine polyester :

C'est une résine thermodurcissable la plus utilisée et la moins chère. Les résines polyester Présentent de bonnes propriétés mécaniques surtout en termes de rigidité (module d'Young).

III.3.2. Caractéristiques des résines polyester :

La résine polyester polymérise par adjonction de catalyseur Fig.III.1, dans les proportions suivantes, le pourcentage est adapté en fonction des besoins :

2% maximum (temps de travail court).

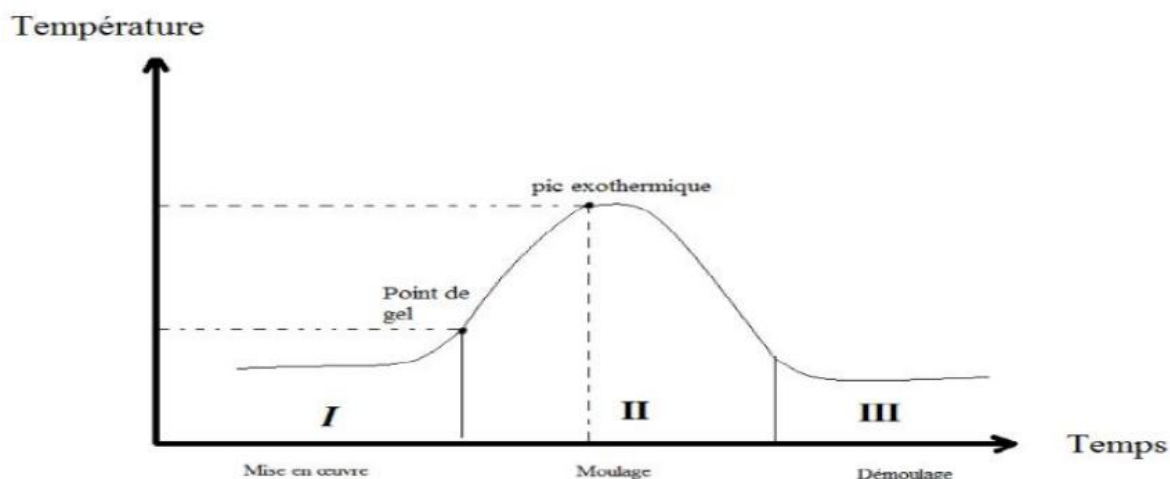


Figure (III.1) : Cycle de polymérisation de polyester.[18]

Les caractéristiques de la résine polyester sont indiquées dans le tableau suivant :

Les caractéristiques	Polyester
Densité (g/dm ³)	1.2
La température de Polymérisation (C°)	60 – 100

Tableau (III.1) : Différentes caractéristiques de la résine polyester.

III.3.3. Avantages et inconvénients de l'utilisation de la résine polyester

La résine polyester peut présenter des avantages et des inconvénients au cours de l'utilisation.

Ces dernières sont représentées dans le tableau suivant :

Avantages de résine polyester	Inconvénients de résine polyester
Stabilités dimensionnelles	Fragile au choc et faibles propriétés à partir de 120 C°
Bonne mouillabilité des fibres et des tissus Renforts	Retrait important de 8% à 10%
Bonne tenue chimique	Très forte réactivité
Bonne rigidité	Odeur nauséabonde
Etuvage non indispensable	Difficulté des Mélanges en faible quantité

Tableau (III.2) : Avantages et inconvénients de la résine polyester.[18]

III.4. la plante d'alfa :

L'Alfa est une herbe vivace typiquement méditerranéenne, elle pousse en touffes d'environ 1m à 1m20 de haut formant ainsi de vastes nappes. Elle pousse spontanément notamment dans les milieux arides et semi arides, elle délimite le désert, là où l'Alfa s'arrête, le désert commence. Herbe d'Afrique du nord et l'Espagne, appelée aussi spart ou sparte. Elle fait partie de la famille des graminacées.



Figure (III.2) : Les fibres d'alfa.

III.4.1 L'extraction de la plante alfa :

C'est un travail préliminaire qui s'impose avant de commencer l'extraction des fibres, pour mieux préparer les tiges aux différents traitements, cette préparation facilite et augmente l'efficacité des opérations d'extraction qui suivent

La première opération consiste à éliminer toutes les impuretés et les corps étrangers de façon à n'avoir que des tiges propres et utilisables. Ensuite, les extrémités des tiges sont découpées parce qu'elles présentent la variation la plus importante du diamètre. D'un côté, l'extrémité supérieure a la forme de pointe assez aigüe et de l'autre côté, l'extrémité inférieure a la forme d'un pied courbé très rigide (figure III.3). Il est très important de les éliminer parce que ces crochets, après extraction, deviennent des noeuds et les fibres fines se mettent autour pour former une sorte de «Neps»: une masse de fibres irrémédiablement emmêlée. Dans certains cas, où la variation du diamètre entre extrémité supérieure et inférieure est très importante, il est préférable de découper et ne travailler que sur la partie centrale des tiges afin d'avoir un effet identique sur toute la longueur.

III.4.2. Extraction des fibres :

Pour extraire les fibres d'alfa, nous suivons les étapes suivantes :

III.4.2.1. Rouissage dans l'eau :

Après élimination des impuretés et les corps étrangers en passe à rouissage dans l'eau pendant 25 jours

III.4.2.2. Brossage de la tige :

Une brosse métallique permet d'extraire les fibres, puis de les mettre au bain-marie, puis de les laisser à l'air libre pendant 18 heures



Figure (III.3) : Brossage de la tige



Figure (III.4) : Séchage à l'air libre

III.4.2.3 Etuvage des fibres :

Après le processus de séchage, nous mettons les fibres dans une étuve à une température de 70 degrés et les mettons pendant 6 heures jusqu'à obtention des fibres alfa non traité



Figure (III.5) : Etuvage des fibres à 70°C



Figure (III.6) : Fibre alfa non traité

III.4.2.4. Traitement alcalin L'hydroxyde de sodium :

L'hydroxyde de sodium est un composé chimique alcalin avec une formule chimique qui est NaOH. Aussi connu sous le nom de soude caustique, est utilisé dans de nombreuses industries, le degré de solubilité dans l'eau est très élevé .

Masse molaire	39,997 g / mol
La formule	NaOH
Densité	2,13 g / cm
Point de la fusion	318 °C

Tableau (III.3) : Différentes caractéristiques de L'hydroxyde de sodium.

C'est le Nettoyage où le prétraitement de nos fibres dans un bain d'hydroxyde de sodium (NaOH 5%) pendant 18H. Afin d'enlever la cire qui est placée sur les fibres et éliminer toutes impuretés collées.



Figure (III.7) : Traitement alcalin

III.4.2.5 Rinçage de l'eau distillée :

Cette opération a pour but de gonfler légèrement les fibres, de les nettoyer et d'extraire les cires de la paroi extérieure, les fibres sont ainsi mieux préparées à l'extraction proprement dite

III.4.2.6 Séchage à l'ambiante (24H) et Etuvage à 60 °C :

Nous laissons les fibres à l'air libre pendant 24 heures et les mettons dans un four à une température de 60 degrés



Figure (III.8) : Etuvage des fibres

III.5. Tissage :

Nous avons dupliqué manuellement les fibres d'alfa pour obtenir des tissages

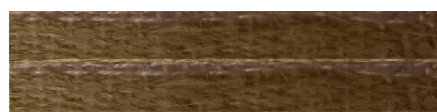


Figure (III.9) : Tissage des fibres

III.6. La mise en œuvre du bio-composite :

Après le tissage, nous avons préparé nos bio-composites à matrice polymérique et à fibre végétale, en utilisant le moulage sous vide. La mise en œuvre du matériau est effectuée au sein du laboratoire de moulage de génie mécanique (université de M'sila).

III.6.1. La technique de moulage utilisée :

Dans ce travail on a choisi la technique de moulage sous vide, le principe de ce procédé est de réaliser une plaque de composite avec une résine thermodurcissable sous vide à la température ambiante.

Les avantages de cette technique sont :

- Éliminer les bulles d'air.
- Augmenter le taux des tissus d'alfa.
- Obtenir un état de surface très lisse.

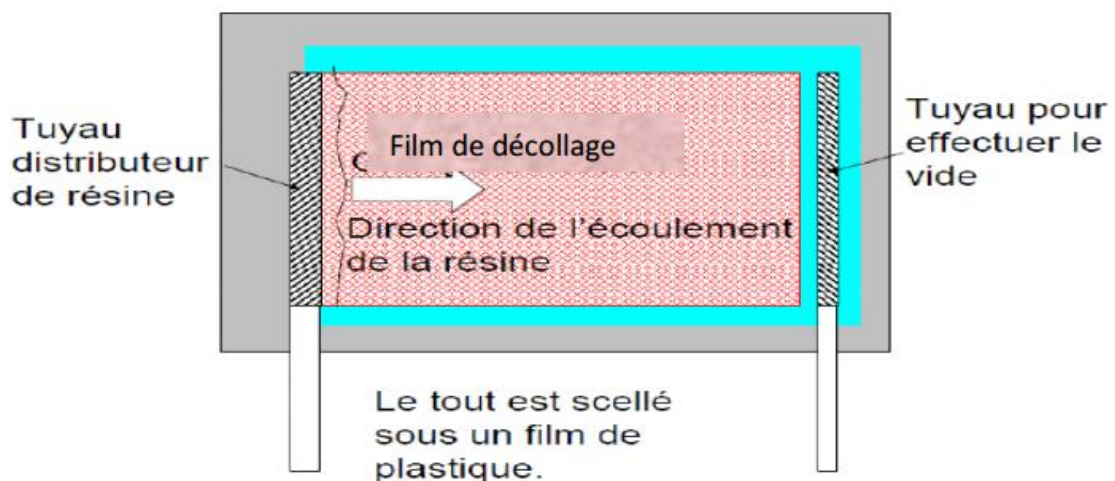


Figure (III.10) : mécanisme de moulage sous vide[19]

III.7. préparation de l'éprouvette :

Les éprouvettes sont préparées suivant la norme ASTM D3039 où nous avons utilisé des éprouvettes plates dont la longueur de la section utile est d'un ordre de grandeur (i.e. 6 fois) supérieure à la largeur (figure III.10.B) pour but d'éliminer le problème de l'initiation des ruptures au voisinage de la zone de transition. Les éprouvettes répondent aux exigences des conditions de l'essai de traction par l'utilisation des talons en alfa (figure III.12. A), ce qui permet d'éviter l'effet des glissements entre les mors de serrage et l'éprouvette, qui bien souvent sont responsables de perturbations importantes dans les mesures effectuées.

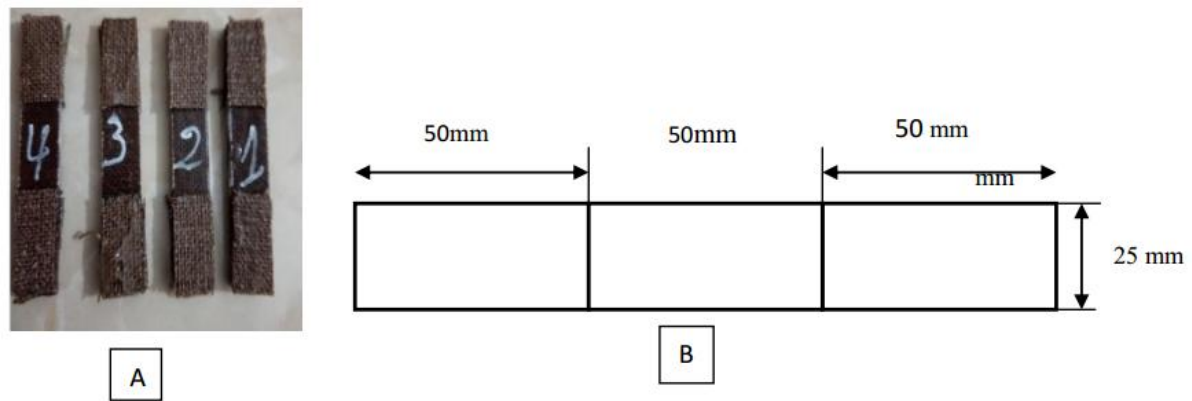


Figure (III.10) : Les dimensions des éprouvettes. (ASTM3039)

L'essai de traction est l'essai mécanique le plus fréquemment utilisé pour la caractérisation des matériaux. Il consiste à soumettre une éprouvette du matériau à un état de contrainte uni directionnel (Figure.III.11).

Trois échantillons ont été testés, Les essais de traction ont été effectués en utilisant une machine de traction universelle (MTS Traction formation 106)(Figure.III.12).Elle est équipée d'une cellule de charge de 5 kN et d'un système d'entraînement de la traverse à l'aide d'un moteur électrique.

La machine est pilotée par un logiciel qui permet d'enregistrer les résultats des forces et déplacements sur un fichier texte sous forme d'un procès-verbal d'essais qu'on pourra exploiter par la suite sur un ordinateur en utilisant un utilitaire (Microsoft Excel, Origine, Matlab, ...) qui permet de lire le fichier récupéré.

Les essais étaient menés à une vitesse de déplacement de traverse de 1 mm/min. Le module d'Young est calculé à partir de la zone linéaire de la courbe contrainte-déformation

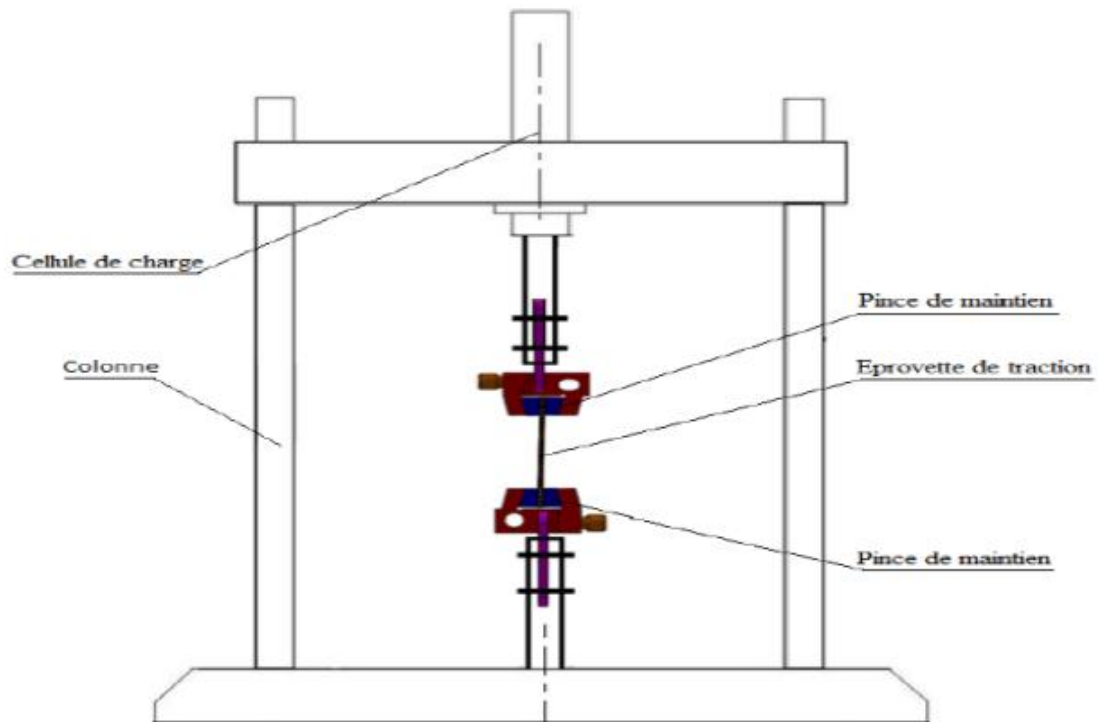


Figure (III.11) : Schéma de principe de la Machine d'essai de traction[20].



Figure (III.12) : Echantillon soumis à la traction

III.8. Conclusion :

Ce chapitre est consacré à la description de la technique expérimentale et les normes utilisées pour les essais mécaniques sont décrites dans ce chapitre ainsi que la méthode de développement d'une éprouvette ASTM pour effectuer le processus de traction

Chapitre IV

Résultat et discussions

IV.1.Introduction

Dans ce chapitre, les résultats expérimentaux obtenus à partir de différents tests seront présentés et interprétés dans ce dernier chapitre. Dans un premier temps, nous analyserons les constituants de notre ATR-FTIR, puis discuterons de l'évolution des propriétés mécaniques des bio particules selon leurs standards (traité et non traité). Les fissures de notre composé biologique (Polyester /d'alfa) sont également présentées et discutées en fonction des propriétés mécaniques

IV .2 Comportement mécanique :

La Figure 1 montre un comportement typique de traction d'une fibre unitaire d'alfa. L'évolution de la contrainte de traction en fonction de la déformation longitudinale dans l'axe de traction est quasi-linéaire jusqu'à la rupture de l'échantillon. La rupture d'une fibre unitaire est fragile, la contrainte à rupture chute instantanément après avoir atteint sa valeur maximale. En regardant de plus près le comportement mécanique d'une fibre unitaire, nous constatons que son comportement peut être divisé en trois parties,

Ces trois parties sont la conséquence d'une variation de l'incrément de constant au cours de la sollicitation contrainte par rapport à l'incrément de déformation. Le rapport $\Delta\sigma/\Delta\varepsilon$ n'est pas.

- ✓ ✓ La zone I est non-linéaire et représente l'alignement des micro-fibrilles constituants la fibre et la mise en tension, des défauts et des zones amorphes présents dans la fibre. Par conséquent, la rigidité de la fibre évolue de manière non-proportionnelle en fonction de la déformation et augmente lentement. Ce comportement peut être interprété par le glissement des microfibrilles ainsi que leur alignement progressif avec l'axe des fibres. Comme nous venons déjà de l'observer, qu'en raison du faible diamètre de la fibre d'alfa (de 5-8 μm), les échantillons testés peuvent être assimilés à des faisceaux de fibres ou de cellules composées. Il est notable que le comportement en traction est également dépendant des interactions et de la disposition des fibres à l'intérieure du faisceau des fibres. Ces interactions sont principalement influencées par le nombre de fibres de chaque faisceau testé, mais aussi par le degré de rouissage local influençant la qualité de la lamelle moyenne et de la cohésion entre les fibres.
- ✓ ✓ La zone II représente un comportement élasto-viscoplastique de la fibre.
- ✓ ✓ La zone III correspond à la zone élastique du comportement de la fibre et cela jusqu'à rupture de la fibre.

De manière générale, la zone I représente un faible pourcentage de la déformation totale à rupture de la fibre, environ 12%. La zone II représente une part plus importante de la déformation de 10 à 35% en fonction de la fibre testée. Et la zone III représente la majorité de la déformation à rupture avec plus de 50% de la déformation totale. Ces deux dernières parties étant linéaires et la fibre ayant

un comportement fragile, la contrainte et la déformation à rupture sont déterminées par la rigidité de la fibre.

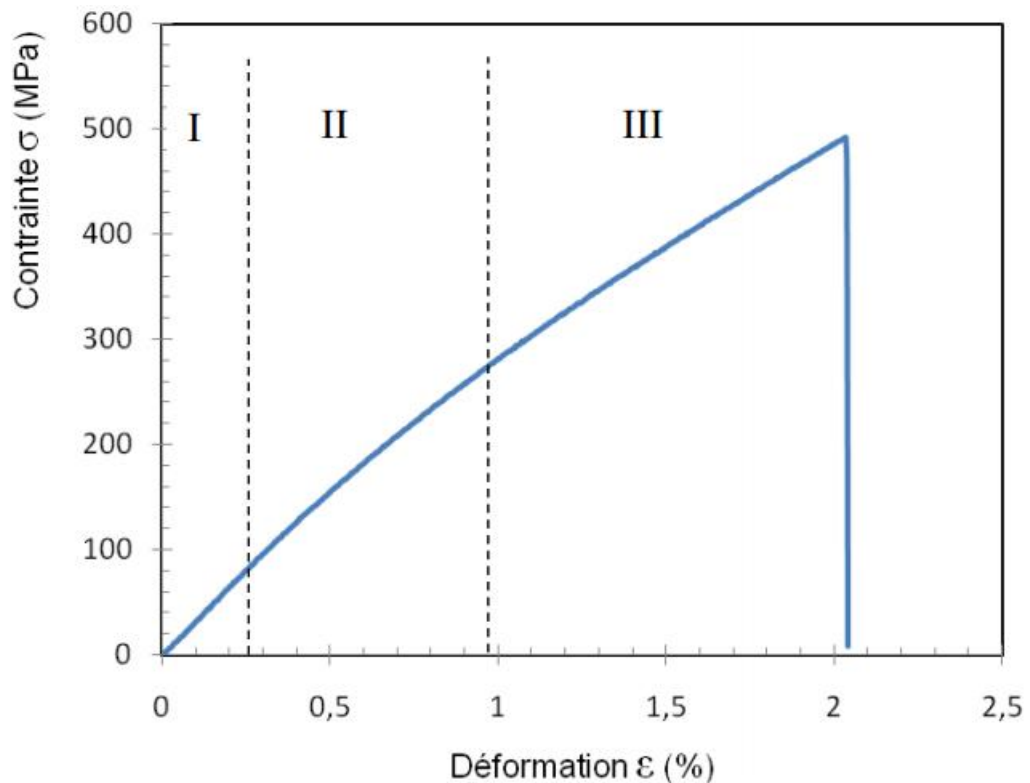


Figure (IV. 1) : Comportement mécanique en traction des fibres unitaires d'alfa

IV.3 .Caractérisations mécaniques :

Dans ce paragraphe, les résultats des tests mécaniques, obtenus à la suite d'essais de traction des bio-composites, sont illustrés et discutés.

IV.3.1. Analyse des courbes contrainte-déformation de bio composite :

Les résultats des tests en traction indiquent le comportement mécanique des éprouvettes de bio composite renforcés par des tissus de d'alfa traitées.

IV.3.1.1 Essai de traction bio composite :

Des essais de traction ont été réalisés jusqu'à rupture des éprouvettes, pour assurer un bon clonage des résultats, quatre éprouvettes ont été testées au moins à une vitesse de 2 mm / min.

Les dimensions des éprouvettes sont préparées selon la norme ASTM D 3039 où $L = 150$ mm, $b = 25$ mm, et $e = 5$ mm, qui sont respectivement la longueur, la largeur et l'épaisseur des éprouvettes testées.

IV.3.1.2 Caractérisation mécanique en traction des bio composites :

Les éprouvettes testées obtenues à partir des bio composites élaborés sont caractérisées à tissu traité et non traité et avec 4plis dans le sens de chaîne.

Catre éprouvette au moins du même échantillon traité testé en traction. Lors de cet essai, les éprouvettes ont été chargées en traction monotone jusqu'à la rupture.

Les figures (2 ; 3) représentent les deux courbes de l'évolution de la contrainte en fonction de la déformation (σ - ϵ) des échantillons (alfa / polyester) à $T=(60^{\circ}\text{C})$ testée en traction dans le sens de chaîne.

Ces courbes montrent que le matériau présente un comportement non linéaire indépendamment de l'état du tissu (traité), Cette non linéarité n'est pas due à une déformation plastique comme dans le cas des métaux ductiles, mais elle résulte des dommages microscopiques tels que la rupture des fibres, la fissuration de la matrice, la décohésion interfaciale fibre/matrice et le délaminage, qui peuvent se produire à des contraintes relativement faibles. Ces dommages augmentent en taille, à différents points du composite lorsque la contrainte augmente. Ils ne provoquent pas une rupture immédiate du composite, mais sa rigidité diminue progressivement.

La distribution de ces dommages microscopiques est fortement influencée par la température de mercerisations et ce en raison du changement de l'affinité entre la fibre et la matrice.

Les courbes de contrainte et de déformation des quatre éprouvettes du même échantillon ont des comportements similaires et presque identiques, avec une petite dispersion surement elle est due aux étapes de l'élaboration sou vide. L'évolution se produit en trois étapes, on constate, au début une courbure jusqu'à une certaine valeur, qui est de l'ordre de 0,5% de la déformation, puis une linéarité caractérisée par une augmentation jusqu'à la contrainte maximale. Cette dernière varie presque à mesure que la déformation augmente jusqu'à atteindre sa valeur maximale lorsqu'une rupture soudaine est atteinte.

Les valeurs des contraintes moyennes sont respectivement de l'ordre de 5,9, 5,38 et 5,28 ; 3,29 pour les biocomposites.

L(mm)	0	4.27	0	1,0662	3.8706	5.8722	6/992	7,232	7,5094
F (kN)	0	0	0	0,19	1.97	4.39	5.9	4.9	0.03

Tab (IV.1) : allongement sous contrainte traité 1

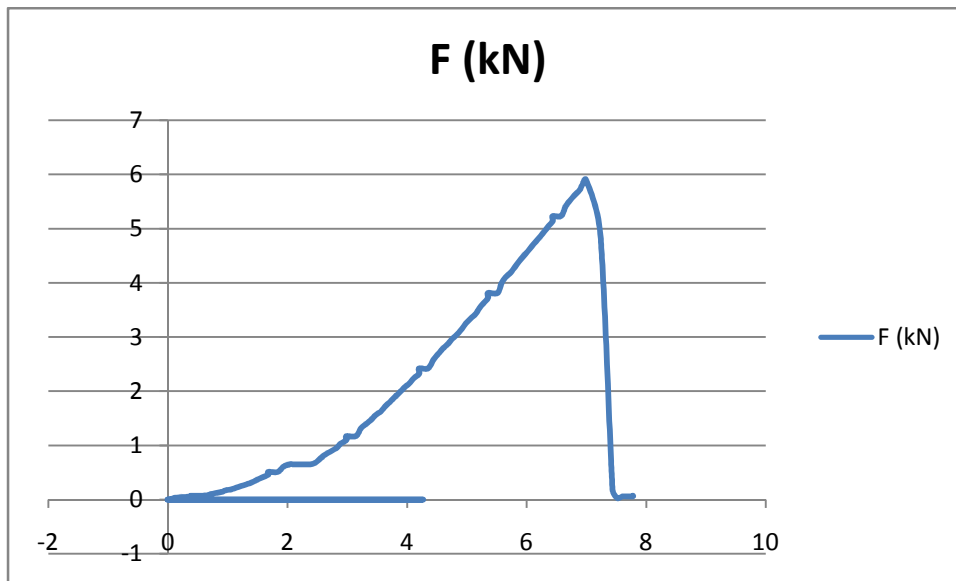


Figure (IV.2) : diagrammes allongement sous contrainte traité 1

L(mm)	0	2,5584	0	1,856	2,7878	3,4	4,7666	7,5844	7,8066
F (kN)	0	0,08	0	0,7	2,7878	1,5	2,67	5,28	0,17

Tab (IV.2) : allongement sous contrainte non traité 1

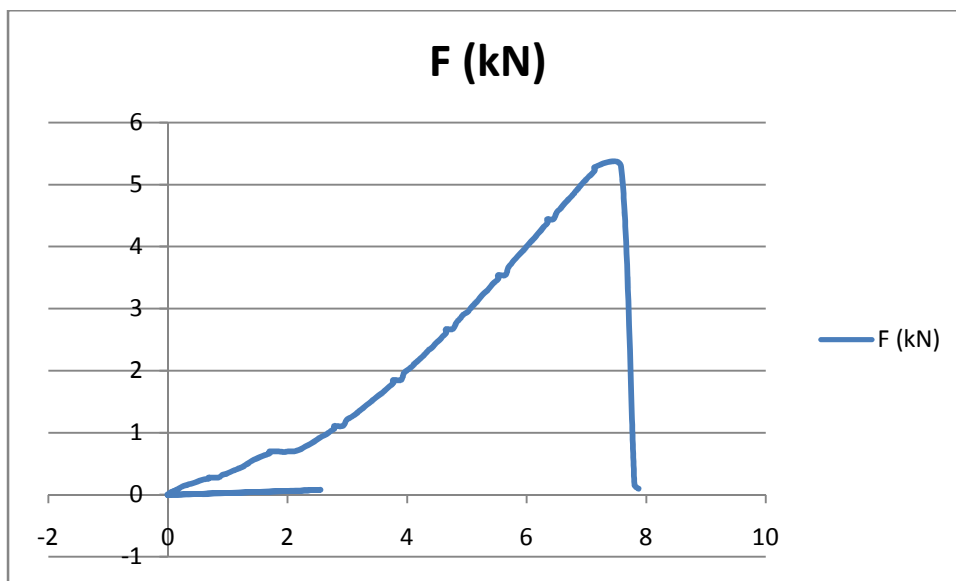


Figure (IV.3) : diagramme allongement sous contrainte non traité 1

IV .4 Analyse et résultat des éprouvettes en traction :

Afin de refléter le comportement mécanique des éprouvettes, on a testé les éprouvettes de Traction relatives aux tissu traité et non traité avec polymère .La figure représente l'évolution de la charge en fonction du déplacement du béton polymère

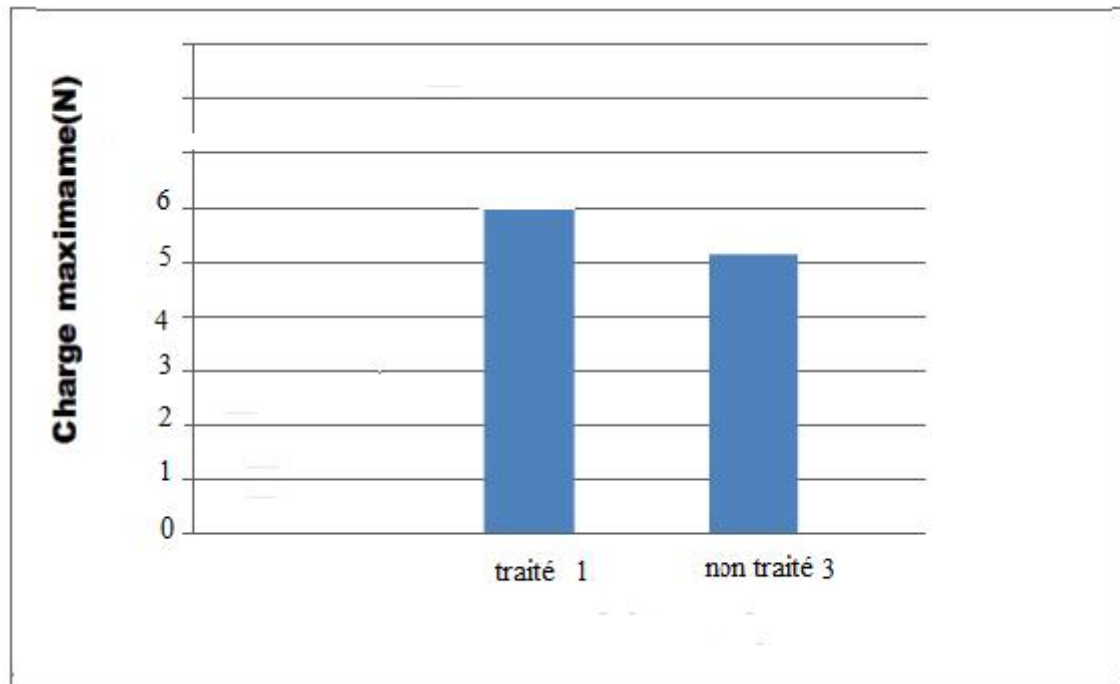


Figure (IV.4): Paramètres de traction des éprouvettes testées (Charge maximale)
Eprouvette traité 1, et non traité 3.

De cette histogramme (*Figure V.9*), il semble que l'orientation de tissu de alfa située à 90° améliore les caractéristiques mécaniques de l'alfa/polyester en traction. Mais ces valeurs sont liées aussi à l'effet de taille (dimensions de l'éprouvette). Donc on ne peut pas donner une comparaison finale sans comparer les différentes contraintes et modules en traction.

IV.5 Allongement à la rupture :

Une analyse des données numériques recueillies permet de calculer les caractéristiques mécaniques par traction de la fibre de alfa. Le rassemble les valeurs des modules d'élasticité (E), de résistance à la traction (Rm) et de l'allongement à la rupture (A) obtenues sur tous les échantillons testés.

Les graphiques de la figure..... présentent les résultats synthétisés de l'analyse statistique de ces caractéristiques. Il en ressort que la fibre de RC, soumise à la traction, présente un module d'élasticité moyen de 12.7GPa, une résistance à la traction de 150 MPa et un allongement à la rupture moyen de 1.6%. Les résultats obtenus pour les deux fibres sont du même ordre que celles disponibles précédemment.

L (mm)	0	0,0196	0	-0.0004	0,755	2,4596	4,1578	5,2242	5,5554	5,8888
F (kN)	0	0.02	0	0.02	0,25	1,02	2,61	3,29	1,73	0,06

Tableau (IV.3) : allongement sous contrainte traité 1

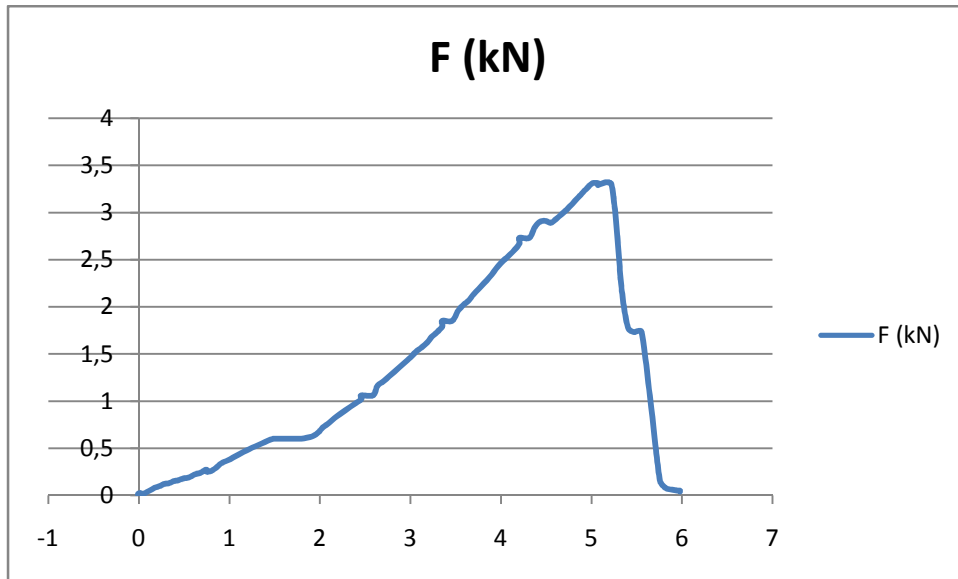


Figure IV.5 : diagramme allongement sous contrainte traité 1

L(mm)	0	0,3794	2,5882	3,3864	3,6086	3,8868	4,1124	4,4076	4,5898
F (kN)	0	0,03	1,09	2,18	2,57	3,16	3,38	1,12	0,01

Tableau (IV.4) allongement sous contrainte traité 2

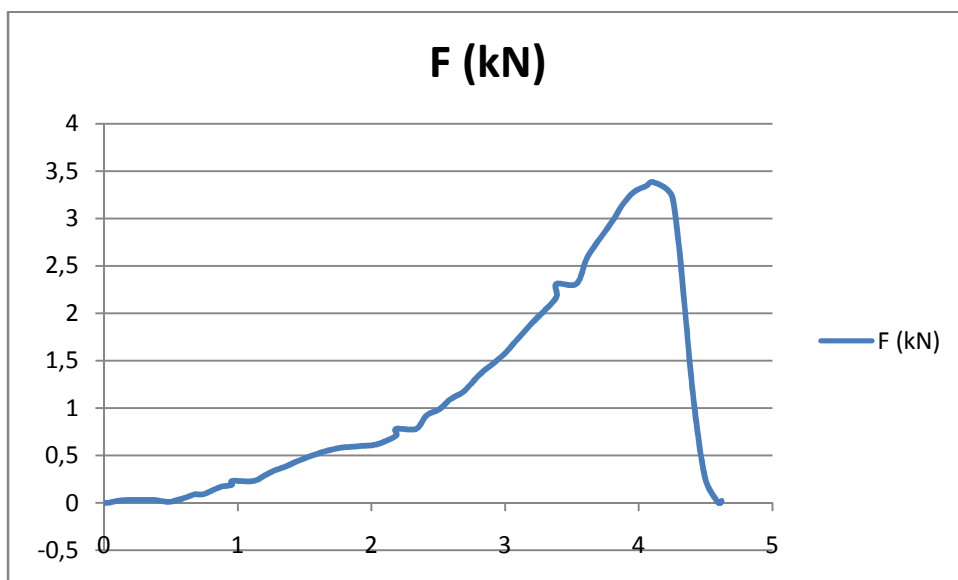


Figure (IV.6) : diagrammes allongement sous contrainte traité 2

Les résultats montrent la moyenne des paramètres de déformation, de résistance à la traction et module de Young des éprouvettes testées. que les propriétés mécaniques des composites s'améliorent par rapport à la température, mais à partir de $T = 70^{\circ}\text{C}$ on remarque que les propriétés mécaniques de nos composites (tissus de alfa non traités/ polyester) commencent à se dégradées et d'autre part, l'impact du jeu sur les propriétés mécaniques est clairement évident.

IV.6 Conclusion :

Afin d'améliorer l'adhésion entre les tissus et la matrice, les tissus sont soumis à différentes températures de traitements. Différents composites sont donc élaborés à partir des tissus traités par la soude. Si l'on compare maintenant les propriétés mécaniques de nos composites pour différentes traité on peut dire que :

La résistance en traction est meilleure de tissu traité à 5%de NAOH par rapport a autre tissu (non traité), cela indique que cette température du traitement par la soude entraine une meilleure modification sur les propriétés mécanique de ce composite. Cela a été démontré par nos résultats.

Conclusion générale

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Notre travail a fait l'objet de l'élaboration et la caractérisation d'un matériau composite bidirectionnel à renforts végétales (alfa-polyester). Cela est fait au sein du laboratoire de moulage à l'université de Msila.

De nos jours, quelques caractéristiques particulières freinent encore l'emploi des fibres de alfadans la fabrication de composites structuraux. D'abord, en tant que matériaux naturels, elles sont très sensibles à leur environnement : des conditions extrêmes, ou même seulement anormales, de température ou d'humidité altèrent profondément leur structure. Ensuite, leur variété ainsi que les conditions de leur croissance influent notablement sur leurs propriétés mécaniques, qui sont d'ailleurs particulièrement dispersées, sans commune mesure avec la plupart des matériaux synthétiques

Afin d'améliorer l'adhérence entre le tissu et la matrice qui est notre but essentiel, les tissus d'Alfa sont déposés dans des traitements alcalins de 5% NaOH pendant 2h pour différentes températures qui variées de 60°C jusqu'à 90°C. Ainsi, différents composites sont produits à partir de ces tissus traités à la soude et avec une matrice en polyester. Suite à une comparaison des propriétés mécaniques de nos composites à différentes températures, on peut tirer les conclusions suivantes:

La résistance à la traction de nos composites tissus de alfa / polyester sont meilleures pour les échantillons traité à 90 °C par rapport aux autres températures, indiquant que la température de ce traitement à la soude conduit à un meilleur ajustement aux propriétés mécaniques de ce composite. Cela a été démontré dans le chapitre IV.

Finalement et pour conclure, l'utilisation de fibres naturelles comme renfort de composites à matrice polymère est en passe de devenir industriellement viable, grâce à leurs nombreux avantages écologiques, économiques, physiques et mécaniques. Cependant, le développement de ces éco-composites exige la levée d'un certain nombre de verrous, liés au choix des variétés, aux méthodes d'extraction et de sélection des fibres, et de la réalisation de semi-produits techniques. A tout cela viennent s'ajouter des difficultés fondamentales, telles que la définition des paramètres géométriques à la base de la caractérisation mécanique, l'optimisation de la compatibilité entre les fibres et la matrice, et l'amélioration de la stabilité hygrothermique et mécanique des composites.

Références bibliographiques

références bibliographiques

- [1] Jean-M Berthelot mécanique et analyse des structure 5^eédition 2012 Lavoisier Paris IBBN : 978-2-7430-14507
- [2] Nadia bahlouli « Cours Matériaux composites /DESS Mécanique avancée et stratégie industrielle » IOST-ULP
- [3] A. BOUDENNE, "Etude expérimentale et théorique des propriétés thermo physiques d'matériaux composites à matrice polymère," Université PARIS XII, 2003.
- [4] CARMA « Glossaire des matériaux composites » Actualisation octobre 2006
- [5] JoelCugnoni, « Identification par recalage modal et fréquentiel des propriétés constitutives de coques en matériaux composites », Thèse, Ecole Polytechnique fédérale de Lausanne, 2005.
- [6] L. Berreur, B. d. Maillard, and S. Nösperger, "L'industrie française des matériaux.
- [7] GURIT, « Guide to Composites, » 1 Janvier 2013.
- [8] : J. Weiss et C. Bord (1983). Les Matériaux Composites (tomes 1 et 2). Editions del'Usine, Paris.
- [9] : M. Geier et D. Duedal (1985). Guide pratique des matériaux composites. Technique et Documentation, Paris.
- [10] : R.G. Weatherhead (1980). FRP Technology. Fibre ReinforcedResinSystems. Applied Science Publishers, Londres.
- [11] : A. Bouarissa, Comportement mécanique d'un matériau fibre jute/époxy : Elaboration et caractérisation, mémoire de master, université de Boumerdes. 2013.
- [12] : M. Sellik, Influence des différents séquences d'empilement sur le comportement mécanique en traction d'un stratifier jute/époxy, mémoire de master, université de Boumerdes . 2013.
- [13] MostarAbdessamed, « influence des ajouts de fins minérales sur les performances mécaniques des bétons renforcé de fibre végétales de palmier dattier », université de KasdiMerbah Ouargla option génie civil, novembre 2006.
- [14] Mustapha Malha, « Mise en œuvre, caractérisation et modélisation de matériaux composites : polymère thermoplastique renforce par des fibres de Doum », Université Mohammed V – AGDAL, Mars 2013.

- [15] Zapata Massot Céline, « synthèse de matériaux composite par Co-broyage en voie sèche et caractérisation des propriétés physico-chimique et d'usage des matériaux », institut national polytechnique de Toulouse, décembre 2004.
- [16] <http://www.ac-nice.fr/>
- [17] F.Laurans, A.Déjardin, J.Pilate, "Physiologie de la formation des parois de fibres de bois", composites et matériaux avancés, Vol.16, pp.27-39,2006.
- [18] HaidarMurhaf, « optimisation et durabilité des micro-bétons à base d'époxyde », thèse doctorat université de Cergy-pontoise, spécialité génie civil, mars 2011.
- [19] Nicolas Tessier- Doyen, « Etude expérimentale et numérique du comportement thermomécanique de matériaux réfractaires modèles », L'université de limoges, 2003
- [20]- Ehrburgeret, P., Donnet, J.B. (1980). Interface in composite materials. Philosophical Transactions of the Royal Society A, 294(1411), 495-505.