



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 :

**BOUCHAREB Samira & BOUCHERIT Boumediene**

### Thème

---

**TISSAGE DE FIBRES VEGETALES POUR CARACTERISATIONS**

**MECANIQUE DES COMPOSITES BIDIRECTIONNELS**

---

Devant le jury composé de :

<b>NOM et Prénom</b>	<b>Grade</b>	<b>Qualité</b>
RAHMOUNI Z. E. A	Professeur	Président
ROKBI M	MCA	Encadreur
ZEGGANE H	MCA	Examineur
MEDDAH M	MAA	Examineur

*Année Universitaire : 2017 / 2018*

N° d'ordre : GM/...../2018

# Table des matières

## CHAPITRE I

### Etude bibliographique sur les fibres d'Alfa

#### (Stipa Tenacissima L)

Introduction général .....	1.2
Introduction.....	3
1. Les matières textiles .....	3
1.1. Les fibres naturelles .....	4
1.1.1. Les fibres végétales .....	4
1.1.1.1. Propriétés des fibres végétales.....	4
1.1.2. Les fibres minérales.....	7
1.2. Les fibres chimiques .....	8
1.2.1. Les fibres artificielles .....	8
1.2.2. Les fibres synthétiques .....	9
1.2.3. Les fibres de demain :.....	9
2. La fibre d'Alfa .....	10
2.1. Présentation générale .....	10
2.1.1. Nomenclature botanique.....	10
2.1.2. Répartition géographique .....	10
2.1.3. Etude botanique .....	11
2.2. La récolte de l'Alfa .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
2.3. Domaines d'applications .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
2.3.1 Les tiges de l'Alfa:.....	13
2.3.1.1 Applications artisanales:.....	13
2.3.2 Les fibres de l'Alfa:.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>

## CHAPITRE II

## Obtention des Fibres Végétales

Introduction.....	Erreur ! Signet non défini.
1. Extraction des fibres d'Alfa.....	Erreur ! Signet non défini.
1.1. Les prétraitements.....	Erreur ! Signet non défini.
1.2. L'extraction mécanique.....	Erreur ! Signet non défini.
1.2.1. Le teillage.....	Erreur ! Signet non défini.
1.2.2 Par déflexion.....	Erreur ! Signet non défini.
1.2.3 Par laminage.....	Erreur ! Signet non défini.
1.2.4 Par explosion à la vapeur.....	Erreur ! Signet non défini.
1.3. L'extraction chimique.....	Erreur ! Signet non défini.
1.3.1. Procédé Kraft.....	Erreur ! Signet non défini.
1.3.2. Procédé au bisulfite.....	Erreur ! Signet non défini.
1.3.3. Procédé acide.....	Erreur ! Signet non défini.
1.3.4. Procédé Soude-Anthraquinone.....	Erreur ! Signet non défini.
1.3.5. Procédé à la soude.....	Erreur ! Signet non défini.
1.3.6. Procédé au sulfate neutre de sodium.....	Erreur ! Signet non défini.
1.4. L'extraction biologique :.....	Erreur ! Signet non défini.
1.4.1. Le rouissage à terre.....	Erreur ! Signet non défini.
1.4.2. Le rouissage à l'eau.....	Erreur ! Signet non défini.
1.4.3. Par action microbienne.....	Erreur ! Signet non défini.

## CHAPITRE III

### Tissage des renforts de composite

INTRODUCTION :.....	Erreur ! Signet non défini.
1. Le tissage :.....	Erreur ! Signet non défini.
1.1. Définition:.....	21
1.2. Début du tissage :.....	Erreur ! Signet non défini.
1.3. L'évolution du métier à tisser :.....	Erreur ! Signet non défini.
2. Matières premières de textiles :.....	Erreur ! Signet non défini.
2.1 Préparation des fils :.....	Erreur ! Signet non défini.
3. Les renforts.....	Erreur ! Signet non défini.
3.1. Tissés 2D:.....	Erreur ! Signet non défini.
3.2. Classes des armures :.....	Erreur ! Signet non défini.

3.2.1. Toile ou taffetas :	Erreur ! Signet non défini.
3.2.2. Sergé $n m \times$ :	Erreur ! Signet non défini.
3.2.3. Satin de $n$ de décochement $m$ :	Erreur ! Signet non défini.
3.3. Architecture de renforcement	Erreur ! Signet non défini.
3.3.1. Unidirectionnelle :	Erreur ! Signet non défini.
3.3.2. Multidirectionnelle aléatoire :	Erreur ! Signet non défini.
3.3.3. Orientée :	Erreur ! Signet non défini.
3.4. Tissés 3D :	Erreur ! Signet non défini.
3.4.1. Principe de base de la formation d'un tissu :	Erreur ! Signet non défini.

## CHAPITRE IV

### Matériaux et Méthodes

#### Expérimentales

Introduction	Erreur ! Signet non défini.
1. Matériaux utilisés	Erreur ! Signet non défini.
1.1. Matrice	Erreur ! Signet non défini.
1.2. Fibres d'Alfa	Erreur ! Signet non défini.
1.3. Toron de Jute	Erreur ! Signet non défini.
2. Fabrication d'un métier à tisser :	Erreur ! Signet non défini.
2.1. Tissage du tissu combiné alfa /jute:	Erreur ! Signet non défini.
3. Préparation du composite	Erreur ! Signet non défini.
3.1. Découpage du tissu préparé :	Erreur ! Signet non défini.
3.2. Compression des tissus combinés :	Erreur ! Signet non défini.
3.3. Procéder de mise en œuvre de composite :	Erreur ! Signet non défini.
3.4. Mise à l'étuve :	Erreur ! Signet non défini.
3.5. Pesage des échantillons de composite :	Erreur ! Signet non défini.
4. Obtention des éprouvettes :	Erreur ! Signet non défini.
5. Essais de traction /flexion sur les composites:	Erreur ! Signet non défini.
5.1. Paramètres d'études traction :	Erreur ! Signet non défini.
5.1.1. Contrainte de rupture	Erreur ! Signet non défini.
5.1.2. Module de Young	Erreur ! Signet non défini.
5.1.3. Paramètres d'études flexion :	Erreur ! Signet non défini.

## CHAPITRE V

## Résultats & Discussions

Préface .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
1. Propriétés mécanique de traction.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
1.1. Analyse des courbes ( $\sigma$ , $\epsilon$ ).....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
1.2. Analyse des modules de rigidité des différents matériaux ....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
1.3. Analyse des contraintes de rupture des différents matériaux	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
1.4 .Analyse des déformations de rupture des différents matériaux	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
2. Propriétés mécaniques en flexion.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
2.1. Analyse des modules en flexion des différents matériaux ...	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
2.2. Analyse des contraintes de rupture des différents matériaux	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
2.3. Analyse des déformations des différents matériaux.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>

# Liste des figures

## Chapitre I

<b>Fig.I.1.</b> Classification générale des fibres textiles.....	02
<b>Fig.I.2.</b> Exemple de représentation schématique de l'agencement des différents Composants des fibres de chanvre à l'échelle micrométrique.....	05
<b>Fig.I.3.</b> Illustration de la plante d'alfa à l'état brut.....	11
<b>Fig.I.4.</b> Morphologie de la plante d'alfa .....	12
<b>Fig .I.5.</b> Les différentes étapes de la récolte de l'alfa (a) l'arrachement, (b) la collecte et (c) la mise en balle .....	13
<b>Fig.I.6.</b> Illustration de la pate d'alfa par la SNCPA.....	14

## Chapitre II

<b>Fig.II.1.</b> Ecang pour teillage manuel (a) cylindres cannelées pour teillage mécanique (b).....	16
---	----

## Chapitre III

<b>Fig. III.1.</b> Premier métier de tissage.....	21
<b>Fig. III.2.</b> Métier à la grande tire (Jacquard P).....	22
<b>Fig. III.3.</b> Nouvelles techniques de fabrication de tissus textiles 3D .....	23
<b>Fig. III.4.</b> Ourdissage vertical de fils.....	24
<b>Fig . III.5.</b> Les trois armures fondamentales du tissage.....	25
<b>Fig. III.6.</b> Définition de l'embuvage.....	26
<b>Fig. III.7.</b> Principales orientations des fibres .....	27
<b>Fig. III.8.</b> Classification des différentes structures textiles .....	28
<b>Fig. III.9.</b> Schéma illustrant le principe de fonctionnement d'un métier à tisser.....	29
<b>Fig. III.10.</b> Etapes de la formation d'un tissu ; (a) ouverture de la foule ; (b) insertion du fil de trame ; (c) Tassage du fil de trame.....	29

## Chapitre IV

<b>Fig. IV.1.</b> Fibres d'Alfa préparées .....	32
<b>Fig. IV I.2.</b> Toron de jute préparé .....	33
<b>Fig. IV I.3.</b> Tissu de Jute utilisé.....	33

<b>Fig. IV I.4.</b> Métier à tissu fabriqué .....	34
<b>Fig. IV I.5.</b> Préparation des fibres Alfa .....	35
<b>Fig . IV I.6.</b> Tissage bidirectionnels de la fibre Alfa /jute.....	36
<b>Fig . IV I.7.</b> Échantillon de tissu élaboré.....	36
<b>Fig. IV I.8.</b> Types de tissu Bidirectionnels élaboré.....	37
<b>Fig. IV I.9. :</b> Présentation des tissus découpé <b>D</b> Jute /jute ; <b>A:</b> jute / Alfa non traité ; <b>B:</b> jute/Alfa traité 5% NAOH ; <b>C:</b> jute / Alfa traité 10% NaOH .....	37
<b>Fig. IV I.10.</b> Machine manuel de compression simple .....	38
<b>Fig . IV I.11.</b> Tissu mise en moulage sous vide.....	39
<b>Fig . IV I.12.</b> Présentation des composites obtenue après moulage sous vide <b>D:</b> Jute /jute ; <b>A:</b> jute / Alfa non traité ; <b>B:</b> jute / Alfa traité 5% NaOH ; <b>C:</b> jute / Alfa traité 10% NaOH .....	39
<b>Fig. IV I.13.</b> Etuve de séchage.....	40
<b>Fig. IV I.14.</b> Machine de découpage des éprouvettes .....	41
<b>Fig. IV I.15.</b> Présentation des éprouvettes obtenues.....	41
<b>Fig . IV I.16.</b> Machine d'essai traction /flexion. INSTRON 5969 _50.....	42

## Chapitre V

<b>Fig. V.1.</b> Evolution de la contrainte en fonction de déformation ( $\sigma$ , $\epsilon$ ). .....	44
<b>Figure V.2.</b> Evolution des modules de Young des composites. ....	45
<b>Figure V.3.</b> Changement de la morphologie de la surface de fibres Alfa suite au traitement Alcalin (a): non traitée, (b): traitée. ....	46
<b>Figure V.4.</b> Composition chimique d'une fibre végétale.....	47
<b>Figure V. 5.</b> Evolution des contraintes des composites.....	48
<b>Figure. V.6.</b> Evolution des déformations des composites.....	49
<b>Figure. V.7.</b> Éprouvettes rompues.....	50

<b>Figure V. 8.</b> Evolution de la contrainte en fonction de la déflexion.....	51
<b>Figure V. 9 :</b> Structure fine des fibres de cellulose.....	52
<b>Figure V. 10.</b> Evolution des modules de flexion des composites.....	53
<b>Figure V. 11.</b> Evolution des contraintes des composites.....	53
<b>Figure. V.12.</b> Evolution de déflexion des composites.....	54

## **Liste des Tableaux**

### **Chapitre I**

<b>Tableau .I.1.</b> Composition en cellulose de quelques fibres naturelles .....	04
<b>Tableau.I.2.</b> propriétés physique de différentes fibres végétales .....	06
<b>Tableau.I.3.</b> propriétés mécaniques en traction de quelques fibres végétales .....	08
<b>Tableau. I.4.</b> composition chimique (en %) de différentes fibres végétales.....	09

### **Chapitre IV**

<b>Tableau. IV.1.</b> Caractéristiques des résines thermodurcissables.....	32
<b>Tableau. IV.2.</b> Désignation des composites obtenue après moulage.....	39
<b>Tableau. IV.2.</b> Illustration de taux du tissu (%).....	40

### **Chapitre V**

<b>Tableau V.1 :</b> Résumé des résultats en traction.....	49
<b>Tableau V.2.</b> Résumé des résultats en déflexion.....	55

## **Introduction générale**

Les matériaux nouveaux sont depuis toujours un axe de recherche et de développement des civilisations et plus récemment des sociétés modernes. Le développement des matériaux s'est accéléré au siècle dernier avec l'entrée dans l'ère industrielle et la croissance exponentielle de la métallurgie et la sidérurgie pour la fabrication de pièces industrielles et de structures de masse. Durant les deux dernières décennies, et jusqu'à présent de nouveaux matériaux composites ont émergé dans le paysage industriel, les contraintes environnementales ont poussé les industriels à développer de nouveaux matériaux issus de ressources renouvelables [1,2], parmi ces dernières on trouve les matériaux à fibres végétales.

Les fibres naturelles telles que le chanvre, le lin, le jute, le sisal, le bambou ou encore le palmier et l'alfa sont introduits dans l'industrie des composites. Par conséquent de lourds investissements sont faits dans le secteur de production agricole de ces fibres. L'utilisation des fibres végétales prend de plus en plus d'ampleur. Les propriétés spécifiques intéressantes, la faible densité et la biodégradabilité de ces fibres ouvrent des perspectives prometteuses. Ces nouveaux matériaux ont connu un essor très important au cours de ces dernières décennies. En effet, les fibres végétales d'Alfa sont en abondance dans le territoire algérien, et présentent de bonnes résistances dans son environnement naturel, c'est pour ces raisons, plusieurs chercheurs ont investi dans ce type de fibre comme renfort dans les matériaux composites.

L'incompatibilité des fibres cellulosiques avec certains polymères est l'un des obstacle majeur qui peut freiner ralentir l'utilisation des fibres végétales. Cette incompatibilité provient de la nature hydrophile des fibres végétales et au caractère plus hydrophobe de la matrice. Cela constitue une difficulté majeure sachant que l'interface est le lieu privilégié du transfert des charges entre le renfort et la matrice. De façon plus générale, l'amélioration de la qualité de l'interface fibre/matrice est le focus des activités de recherche menées sur les composites à base de fibres naturelles.

C'est dans cette objective que vient notre collaboration. En résumé, nous avons essayé de valoriser la fibre végétale d'Alfa sous forme d'un tissage combiné de fibres Alfa et de Jute. Ce tissu dit combiné à été produit dans un métier à main. Trois types de fibres sont utilisés : a) les fibres Alfa non traitées, les fibres Alfa traitées avec 5% NaOH et les fibres Alfa traitées avec 10% NaOH. Et pour comparaison, nous avons utilisé un tissu Jute/Jute . A partir des quatre tissus cités précédemment, quatre composites ont été

élaborés à base d'une matrice thermodurcissable en adoptant la technique de moulage sous vide.

Le développement d'un tissu mixte (combiné) des fibres Alfa/Jute dans un but de fabriquer des composites à base de ce tissu puis d'optimiser les caractéristiques mécanique en traction et en flexion des composites renforcés par tissu combiné non traité, tissu combiné traité à 5% NaOH et tissu combiné traité à 10% NaOH en comparaison avec le composite renforcé par tissu jute /jute, nous fournira sans aucun doute des informations fructueuses et très utiles dans le domaine d'application de ce type des composites .

Une étude bibliographique est faite sur les fibres végétales et spécialement sur les fibres d'Alfa (*Stipa Tenacissima L.*) Après une présentation exhaustive de ses fibres, les principales techniques d'obtention des fibres végétales sont présentées. On présente également des généralités sur le tissage l'évolution du métier à tisser, les armures fondamentales du tissage ainsi Principe de base de la formation d'un tissu.

Etant donné que la littérature est assez riche sur les principales techniques de modification de la surface des substrats cellulosiques, et les principes de modification des fibres cellulosiques d'une part, d'autre part, dans notre étude les fibres non traitées et celles traitées feront l'objet d'autre étude, nous n'avons pas ajouté ce chapitre.

Dans les résultats et discussions, le comportement des quatre composites sous sollicitations statiques sont présentés et discutés. Les effets des différents traitements physico chimiques et mécaniques sont exploités. Le mémoire s'achève par une conclusion générale. Il s'agit d'une synthèse des résultats obtenus, les conclusions tirées de cette étude et les perspectives envisagées

# **CHAPITRE I**

## **Etude**

### **bibliographique sur les fibres d'alfa (stipa tennacissima)**

## Introduction

Depuis son existence, « se vêtir » est apparu comme un besoin fondamental pour l'homme, juste après « manger et boire », il ne cesse d'afficher un intérêt croissant très remarquable aux matières textiles, il les transforme et les adapte à ses besoins, notamment de protection thermique.

Aujourd'hui, ce besoin fondamental a évolué et les matériaux fibreux nous entourent, ils tiennent notre corps au chaud, ils nous protègent, ils sont étroitement liés à notre bien-être, ils réfléchissent notre personnalité et ils sont omniprésents dans nos usages quotidiens, ces applications diverses et variées exigent l'utilisation de matériaux avec des propriétés bien spécifiques, d'où le spectre très large de matières textiles recensées aujourd'hui [1].

### 1. Les matières textiles

La filière textile habillement est très riche de matières fibreuses issues d'origines très variées, et les destinations des produits finis sont de plus en plus diversifiées, les fibres textiles peuvent être classées selon leurs origines ; naturelle ou chimique, ces deux catégories basiques peuvent encore être subdivisées en sous-catégories, ainsi les fibres naturelles peuvent être d'origine végétale, animale ou minérale, quant aux fibres chimiques, elles sont synthétiques ou artificielles selon l'origine du polymère utilisé, (Fig .I.1).

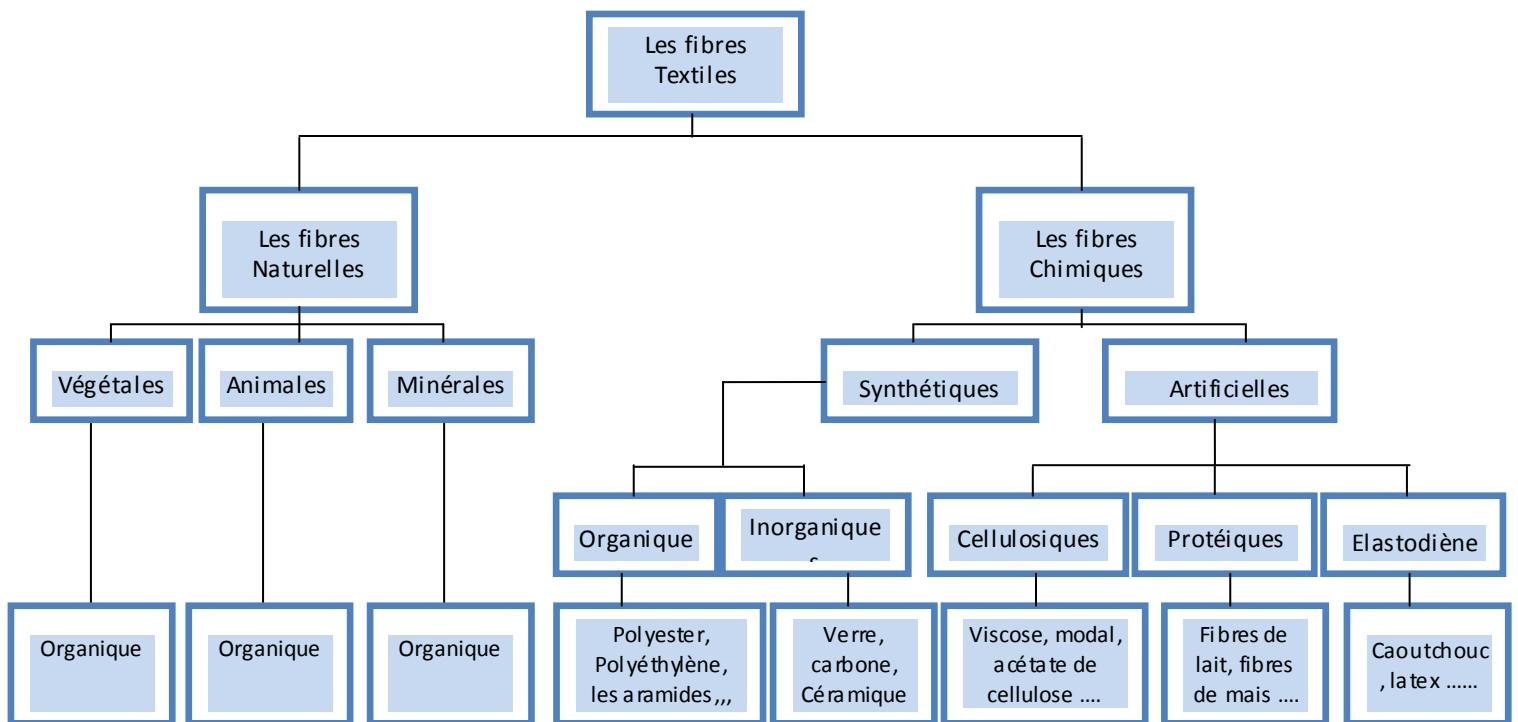


Fig.I.1. Classification générale des fibres textiles [2]

## 1.1. Les fibres naturelles

### 1.1.1. Les fibres végétales

Les fibres végétales sont issues de la biomasse, elles peuvent être extraites du fruit, de la tige ou de la feuille d'une plante, elles sont principalement composées de cellulose, d'hémicelluloses, de lignines et de pectines. [3].

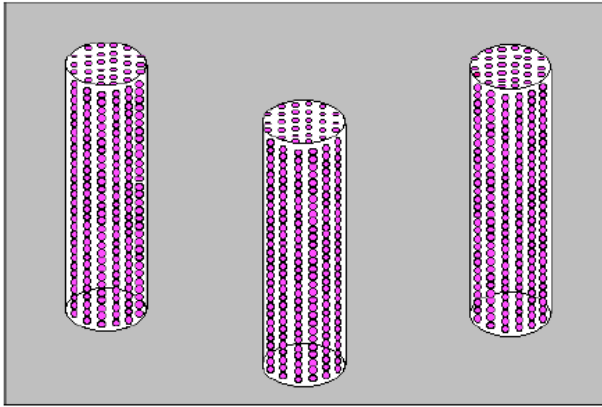
Les proportions de ces constituants varient beaucoup selon les fibres et la cellulose est l'élément constitutif majeur (**Tableau .I.1**), chaque fibre se présente sous la forme d'un bio composite multicouches dans lequel la lignine joue le rôle d'une matrice enrobant l'élément structurant très rigide qu'est la cellulose.

<b>Fibre</b>	<b>% de cellulose</b>
Coton	> 90,0
Jute	64,4
Chanvre	55,0
Lin	64,1
Ramie	68,6

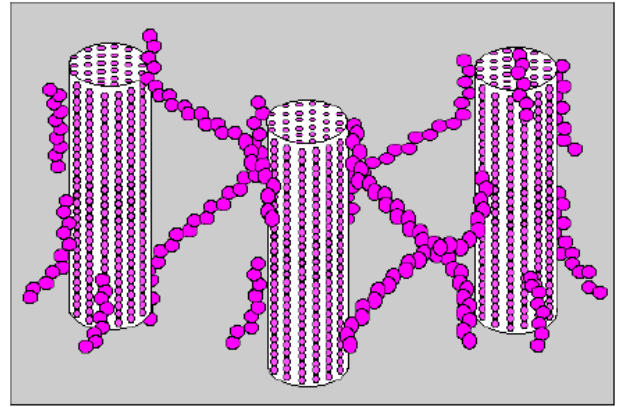
**Tableau .I.1** : Composition en cellulose de quelques fibres naturelles [4].

#### 1.1.1. 1. Propriétés des fibres végétales

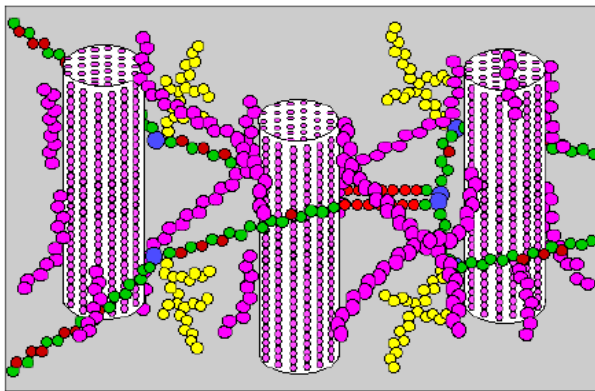
À l'échelle microscopique l'architecture des fibres est complexe selon Sedan [5], elles sont constituées par des fibrilles, elles mêmes formées par des chaînes de cellulose (Fig .I.2.), les chaînes de cellulose s'associent entre elles de façon parallèle par des liaisons hydrogène pour former des micros fibrilles dont la section (de l'ordre de quelques nm) est variable selon les espèces végétales [6], l'enchaînement des unités constitutives de la cellulose induit une rigidité des chaînes qui alliée à la grande régularité des enchaînements et au développement des liaisons hydrogènes inter et intra moléculaires, est particulièrement favorable à une cristallinité élevée, la formation de zones cristallines très cohésives est responsable de l'essentiel des propriétés physiques et chimiques de ce matériau [5].



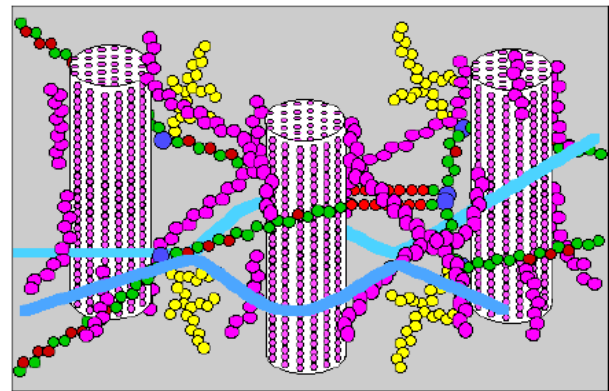
**a : Cellulose seule**



**b : Cellulose et hémicelluloses**



**c : Cellulose, hémicelluloses et pectines**



**d : Cellulose, hémicelluloses, pectines, protéines**

**Fig.I.2.** Exemple de représentation schématique de l'agencement des différents composants des fibres de chanvre à l'échelle micrométrique [5].

À l'intérieur de la fibre, les chaînes cellulosiques sont réunies en micro fibrilles qui en s'agglomérant forment des fibrilles sur plusieurs couches, l'angle qui existe entre ces éléments très structurés et l'axe de la fibre conditionne la rigidité de la fibre [7], les liaisons hydrogènes qui s'établissent le long entre les chaînes macromoléculaires sont à la base des bonnes propriétés des fibres cellulosiques [8].

De point de vue mécanique, la cellulose cristalline est l'un des polymères ayant le module d'élasticité le plus élevé, environ 136 GPa à comparer aux 75 GPa de la fibre de verre, cette rigidité provient de la structure cristalline qui suit un agencement supramoléculaire hélicoïdal très ordonné, lors d'une élongation des fibres, il se produit un couplage torsion/traction qui peut avoir des conséquences sur l'interface, sur la déformation ou sur les mécanismes de rupture d'un composite.

Du point de vue thermique, la plupart des fibres naturelles perdent de leur rigidité dès 160°C et on voit la lignine se dégrader aux alentours de 200°C. [9] a observé des effets irréversibles comme le changement de viscosité, l'augmentation de la dégradation avec l'oxydation néanmoins la destruction de l'ordre cristallin n'apparaît qu'au-dessus de 320°C par agitation thermique des molécules [10].

L'attrait des fibres végétales et leur retour comme matériaux potentiels dans le secteur du textile et des composites sont dues aux différents avantages qu'elles présentent, bien entendu, l'effet de ces avantages varie d'une fibre à une autre et dépende de la composition chimique et physique, la structure, le pourcentage de cellulose, l'angle micro fibrillaire, la section et le degré de polymérisation (**Tableau .I.2**) [11-12].

<b>Fibres</b>	<b>Cellulose (%)</b>	<b>Angle microfibrillaire (°)</b>	<b>Diamètre (µm)</b>	<b>Longueur (mm)</b>	<b>Rapport L / d</b>
<b>Coton</b>	85 - 90	33	19	35	1842
<b>Lin</b>	71	10	5 - 76	4 - 77	1687
<b>Chanvre</b>	70 - 74	6.2	10 - 51	5 - 55	960
<b>Jute</b>	61.1 - 71.5	8	25 - 200	9 - 70	110
<b>Ramie</b>	68.6 - 76.2	7.5	16 - 126	40 - 250	3500
<b>Sisal</b>	66 - 78	20	7 - 47	0.8 - 8	100
<b>Coco</b>	32 - 43	45	12 - 24	0.3 - 1	35
<b>Alfa</b>	45	-	5 - 95	5 - 50	1964

**Tableau .I.2** : propriétés physique de différentes fibres végétales.

Parmi ces avantages, on peut citer [13] :

- ✓ Leur biodégradabilité ;
- ✓ faible densité (allègement) ;
- ✓ Leur renouvelabilité ;
- ✓ Leurs bonnes propriétés mécaniques spécifiques (rapportées à leur densité et à leur Section) (**Tableau .I.3**) ;
- ✓ Leurs bonnes propriétés d'isolation acoustique et d'inertie thermique ;
- ✓ L'absence de résidus après incinération ;
- ✓ Un bilan carbone faible ;
- ✓ Une hydrophile (propriétés d'absorption/désorption d'eau) ;
- ✓ Un faible comportement abrasif ;

Cependant, malgré ces nombreux avantages, les fibres végétales présentent certaines Limites à leur utilisation, telles que [13]:

- ✓ Une faible stabilité dimensionnelle ;
- ✓ Une faible tenue thermique (dégradation à 200° - 230°C) ;
- ✓ Une variabilité de propriétés assez importante selon l'âge, le lieu de croissance, le climat, la direction (anisotropie) et même d'une fibre à une autre appartenant au même lot ;
- ✓ Pour certaines applications, l'hydrophilie et la biodegradabilité peuvent être des freins ;
- ✓ Une dépendance de la récolte (point de vue qualitatif et quantitatif) ;

### **1.1.2. Les fibres minérales**

L'amiante est la seule fibre minérale naturelle, il a attiré l'attention des industriels pour sa résistance à la chaleur, au feu, aux agressions électriques et chimiques et pour son pouvoir absorbant, il a été utilisé pour les patins de freins ou en garniture de chaudières ou fours électriques ou encore dans diverses installations électriques (ex : plaques chauffantes) avant de l'interdire progressivement à cause des risques cancérigènes qu'il présente [15,16].

Fibres	E (GPa)	All (%)	$\sigma$ (MPa)	Densité
Coton	5,5 - 12,6	7 - 8	287 - 597	1,5 - 1,6
Lin	58	3,27	1339	1,53
Chanvre	35	1,6	389	1,07
Jute	26,5	1,5 - 1,8	393 - 773	1,44
Ramie	61,4 - 128	1,2 - 3,8	400 - 938	1,56
Sisal	9 - 21	3 - 7	350 - 700	1,45
Coco	4 - 6	15 - 40	131 - 175	1,15
Alfa	12.7	1.6	75 - 154	1.51

**Tableau .I.3** : Propriétés mécaniques en traction de quelques fibres végétales [14]

## 1.2. Les fibres chimiques

### 1.2.1. Les fibres artificielles

Ce sont des fibres obtenues chimiquement à partir de différentes matières naturelles [17] :

- La cellulose : pour la fabrication de la Viscose, Lyocell, Modal, Acétate de cellulose [18]
- Les protéines : servent comme matière première pour la fabrication des fibres telles que les fibres de lait (caséine)[19].
- Le Latex : produit par certaines plantes (telle que l'Hévéa) et sert à la fabrication des fibres de Latex ou de caoutchouc [20].

Quelle que soit la matière utilisée, le but est d'avoir une solution filable après avoir effectué des traitements chimiques (par exemple la séparation de la cellulose des autres substances non cellulosiques, dissolution du produit...) à fin de la filer à travers une filière de quelques microns de diamètre, les filaments ainsi obtenus soit réunis pour former le fil, soit découpés en fibres de longueur fixe pour intégrer le processus de la filature (obtenir des mélanges par exemple).

La viscose qui partage certaines propriétés avec le coton comme le bon pouvoir absorbant, la douceur au toucher la structure chimique, présente toutefois plusieurs avantages par rapport à

celui-ci en maîtrisant le procédé de filage, il est possible d'obtenir des fibres à haute ténacité, de contrôler la frisure et de choisir la finesse, et donc adapter ces paramètres aux destinations finales du produit [21].

Le procédé de la viscose est relativement lent et compliqué, en plus il n'est pas sans conséquences sur l'environnement, l'apparition de nouveaux procédés qui donnent naissance à des nouvelles fibres plus écologiques, utilisant des solvants inertes (à la place de la soude à haute concentration) et des bains de coagulation à base d'eau (à la place de l'acide sulfurique).

Le tableau .I.4 . donne la composition chimique et les proportions en pourcentage de chaque substance (cellulose, lignine, hémicelluloses, pectine et cire) des fibres végétales les plus utilisées au monde [22-23].

<b>Fibres</b>	<b>Cellulose</b>	<b>Hémicelluloses</b>	<b>Lignine</b>	<b>Pectine</b>	<b>Cire</b>
<b>Coton</b>	85 - 90	5.7	0.7 - 1.6	0-1	0.6
<b>Lin</b>	71	18.6 - 20.6	2.2	2.3	1.7
<b>Chanvre</b>	70 - 74	17.9 - 22.4	3.7 - 5.7	0.9	0.8
<b>Jute</b>	61.1 - 71.5	13.6 - 20.4	12 - 13	0.2	0.5
<b>Ramie</b>	68.6 - 76.2	13.1 - 16.7	0.6 - 0.7	1.9	0.3
<b>Sisal</b>	66 - 78	10 - 14	10 - 14	10	2
<b>Coco</b>	32 - 43	0.15 - 0.25	40 - 45	3 - 4	-
<b>Alfa</b>	45	24	24	5	2

**Tableau .I.4 :** Composition chimique (en %) de différentes fibres végétales

### 1.2.2. Les fibres synthétiques

Les fibres synthétiques sont fabriquées avec des polymères de synthèse obtenus à partir de substances ou de composés fournis par l'industrie pétrochimique [24].

### 1.2.3. Les fibres de demain :

Les fibres ont évolués en fonction du temps et de leurs utilisations, on trouve les fibres naturelles telles que la laine, coton, lin, chanvre ....ext, et les fibres chimiques à bas prix et à forte cadence de production qui répondent aux besoins des industrielles.

De nouveaux besoins et de nouvelles exigences ont apparu, qui intéressent la recherche scientifique, les chercheurs ont portés leurs intérêts sur :

- a-** L'utilisation des polymères dans l'industrie des fibres à mémoire de forme, et à changement de phases en incorporant des céramiques, des antiseptiques, des fonctions colorées.
- b-** Modification de fibres par fonctionnalisation chimique (traitement plasma ou greffage, échange d'ions, antiseptiques...) ou par traitement physique de surface,
- c-** Développement des nano fibres et profiter de leur surface spécifique élevée dans des secteurs émergents comme la filtration, l'énergie, les catalyseurs et la santé,
- d-** Élaboration de nouvelles fibres cellulosiques (naturelles ou artificielles) qui offrent des bonnes performances générales et dont le processus de transformation est très écologique et qui affiche un bilan environnemental positif [25].

### **3. La fibre d'Alfa**

#### **3.1. Présentation générale**

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 (**Fig.I.3**) [26].

##### **3.1.1. Nomenclature botanique**

Nom vulgaire : L'alfa, en anglais Esparto ;

Nom scientifique : Stipa Tenacissima L ;

##### **3.1.2. Répartition géographique**

Par ailleurs, c'est l'une des espèces xérophiles qui caractérise le mieux des milieux arides méditerranéens à l'exclusion des secteurs désertiques, sa terre d'élection est l'Afrique du nord et tout particulièrement les hauts plateaux du Maroc et de l'Algérie, mais cette espèce est présente aussi en Espagne, au Portugal, aux Baléares, et elle s'étend vers l'est jusqu'en Égypte en passant par la Tunisie et la Libye, la limite naturelle de l'Alfa est déterminée par la sécheresse en bordure du Sahara, en revanche au nord et à l'ouest, c'est l'humidité croissante du climat qui l'élimine de la flore, elle est beaucoup plus rare dans les étages subhumide et surtout humide [27-28], la répartition territoriale connue à ce jour est estimée à [29] :

- Algérie: 4.000.000 ha.
- Maroc: 3.186.000 ha.
- Tunisie: 600.000 ha.

- Lybie: 350.000 ha.
- Espagne: 300.000 ha.



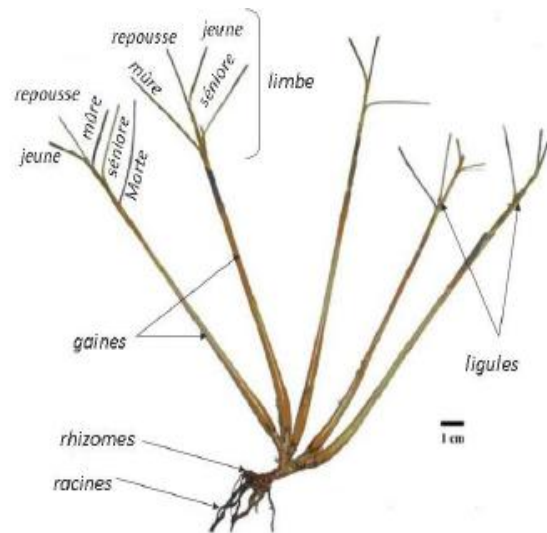
**Fig.I.3** : Illustration de la plante d'alfa à l'état brut

### 3.1.3. Étude botanique

La plante d'Alfa comprend une partie souterraine et une autre aérienne, la partie souterraine appelée le Rhizome est formée d'un réseau complexe de racines très ramifiées de 2 mm de diamètre et profondes de 30 à 50 cm qui se terminent par les jeunes pousses (**Fig.I.4**).

La partie aérienne est constituée de plusieurs branches portant des gaines emboîtées les unes dans les autres, surmontées de limbes longs de 30 à 120 cm, la face inférieure des limbes est légèrement brillante et la face supérieure porte de fortes nervures, l'une et l'autre sont recouvertes d'une cire isolante qui permet à la plante de résister à la sécheresse [30].

La tige est creuse et cylindrique régulièrement interrompue au niveau du nœud par des enchevêtrements des faisceaux, au même niveau se trouvent des bourgeons qui donneront naissance soit à un entre nœud soit à une tige ou reste sous la forme d'une réserve qui entrera en activité lorsque la souche sera épuisée, les feuilles sont cylindriques très tenaces, longues de 50 à 60 centimètres, la fleur est protégée par deux glumes de longueur égale la glumelle supérieure semble partiellement séparée en deux parties et la glumelle inférieure est plus fine, généralement les fleurs apparaissent vers la fin d'avril début mai et sont de couleur verte, le fruit est un caryopse (une sorte de grain) qui mesure 5 à 6 mm de longueur, sa partie supérieure est brune et porte souvent des traces desséchées[31].



**Fig.I.4** : Morphologie de la plante d'alfa.

La floraison a lieu à partir de la fin du printemps et durant tout l'été, cette espèce est hermaphrodite (présentant les 2 sexes sur la même fleur), la pollinisation se fait de manière entomogame c'est-à-dire que le pollen est véhiculé par des insectes et la dissémination des graines se fait par anémochorie (le mode de dispersion des graines des végétaux se faisant grâce au vent) [32].

### 3.2. La récolte de l'Alfa

L'Alfa se récolte après la maturation des graines c'est-à-dire, à partir de juillet-août la récolte commence par l'enlèvement des feuilles uniquement à la main, par arrachage, suivant la pratique adoptée depuis toujours, soit en enroulant les feuilles autour d'un bâton court, soit en se garnissant la main d'une tige de métal, le javeleur saisit une poignée d'Alfa, l'enroule autour d'une tige métallique pour assurer sa prise et tire brusquement avec son pied il retient les racines pour les empêcher d'être arrachées en même temps que les feuilles, celles-ci sont liées en petites balles avec une tresse d'Alfa, puis ces petites balles sont pressées pour constituer les grosses balles qui seront envoyées au centre de collecte, ensuite l'Alfa pesée sera stockée dans ces centres avant d'être transférée à l'usine pour en extraire la pâte à papier en particulier (**Fig.I.5**).

Aujourd'hui, il serait possible de mécaniser la récolte d'alfa mais la voie de la mécanisation n'a pas été suivie, car d'un côté la récolte manuelle fournit un revenu à quelques milliers de cueilleurs, et d'autre part comme c'est une activité saisonnière, cela ne serait pas économiquement rentable en plus de la difficulté d'accès et la topographie particulière des nappes alfatières.



**Fig.I.5.** les différentes étapes de la récolte de l'alfa (a) l'arrachement, (b) la collecte et (c) la mise en balle [1]

### 3.3. Domaines d'applications

Les applications de l'Alfa sont multiples et diversifiées, et peuvent être classées en deux catégories selon la nature de la matière :

#### 3.3.1 Les tiges de l'Alfa

##### 3.3.1 .1 Applications artisanales

Ces tiges une fois filées ou tressées, s'emploient pour la fabrication de cordages et d'objets de sparterie (tels que : des tapis, des paniers, des paillasons, des plateaux, des ficelles ...).

- **Pâturage** : Les nappes alfatières constituent un espace pastoral de réserve tant pour le bétail (bœufs, moutons, chameaux...) que pour la faune sauvage (gazelle...), du fait qu'elle est relativement délaissée par les animaux en présence d'autres ressources pastorales plus appétentes, vu sa faible valeur alimentaire, elle constitue un énorme stock qui permet la survie des animaux pendant les années de disette.
- **Combustible** : Le pouvoir calorifique supérieur de l'alfa varie de 4666 Kcal/kg pour les brins de 1 an et de 5160 et 5163 Kcal/kg pour les brins âgés de 2 ans et de 3 ans respectivement, ce qui lui confère un usage énergétique important sous forme de briquettes combustibles en remplacement ou d'appoint au bois de feu [33].

#### 3.3.2 Les fibres de l'Alfa

- **La pâte à papier** : À la fin du 19ème siècle le papier d'Alfa est apparu, c'est un papier de bonne qualité qui met bien en évidence la valorisation de cette plante et lui donne une grande importance économique, la pâte à papier représente la branche qui consomme le plus d'Alfa (la Société Nationale de Cellulose et de Papier Alfa (SNCPA – Tunisie) produit 25.000 tonnes de papier et 12.000 tonnes de pâte par an) (Fig.I.6) [34].

Cette pâte est essentiellement utilisée dans la fabrication du papier noble usage, du papier cigarette, du papier filtre et du papier condensateur (diélectrique).

- **Non tissés** : Des travaux ont été effectués afin de remplacer des fibres de verre et de carbone, qui à un coût élevé influençant le prix de revient du produit fini, les non tissés sont utilisés comme couche de renfort pour des emboitures dans le domaine orthopédique par exemple [35].
- **Composites** : Analogiquement des études ont été réalisées pour développer des composites à base de fibres d'Alfa dans une matrice de polypropylène, de polyester ou de PVC, ce recours aux fibres naturelles se produit de plus en plus de nos jours à fin de réaliser des composites biodégradables avec des bonnes performances mécaniques et acoustiques et avec moins d'impact sur l'environnement, mais ce type d'application connaît quelques difficultés pour la mise en œuvre telles que des problèmes de cohésion avec la matrice utilisée [36].

Par ailleurs, la feuille d'Alfa fournit également des sous produits puisqu'elle possède des acides gras insaturés, notamment l'acide oléique et l'acide linoléique, pouvant être valorisés dans le domaine diététique et des cires utilisées pour les cosmétiques.

Malgré cette diversité d'utilisations, l'Alfa n'est donc utilisée qu'à son état primitif (des tiges) ou bien en fibres très courtes n'ayant aucune performance mécanique (composites et non tissés) ou encore sous forme de pâte [1].



**Fig.I.6.** Illustration de la pâte d'alfa par la SNCPA [1]

# **CHAPITRE II**

## **Obtention des fibres végétales**

## **Introduction**

Après avoir une étude sur les fibres textiles en général et les fibres végétales en particulier avec un focus sur la plante d'Alfa, nous avons exposé les méthodes d'extraction des fibres végétales utilisées ; il s'agit des procédés mécaniques, chimique et biologique.

### **1. Extraction des fibres d'Alfa**

#### **1.1. Les prétraitements**

Avant de commencer l'extraction des fibres, un travail préliminaire s'impose afin de mieux préparer les tiges aux différents traitements, cette préparation va faciliter et augmenter l'efficacité des prochaines opérations d'extraction.

La matière première arrive sous la forme de bottes (de 1-5 kilos), les tiges contiennent parfois de la terre, des racines, de la poussière ou tout autre type d'impuretés, des tiges mortes sont quelque fois présentes dans le lot, la première opération consiste à éliminer toutes ces impuretés et/ou corps étrangers de façon à n'avoir que des tiges propres et utilisables [1].

#### **1. L'extraction mécanique**

##### **1.1. Le teillage**

Cette méthode consiste à séparer le bois (le casser) des tiges par action mécanique :

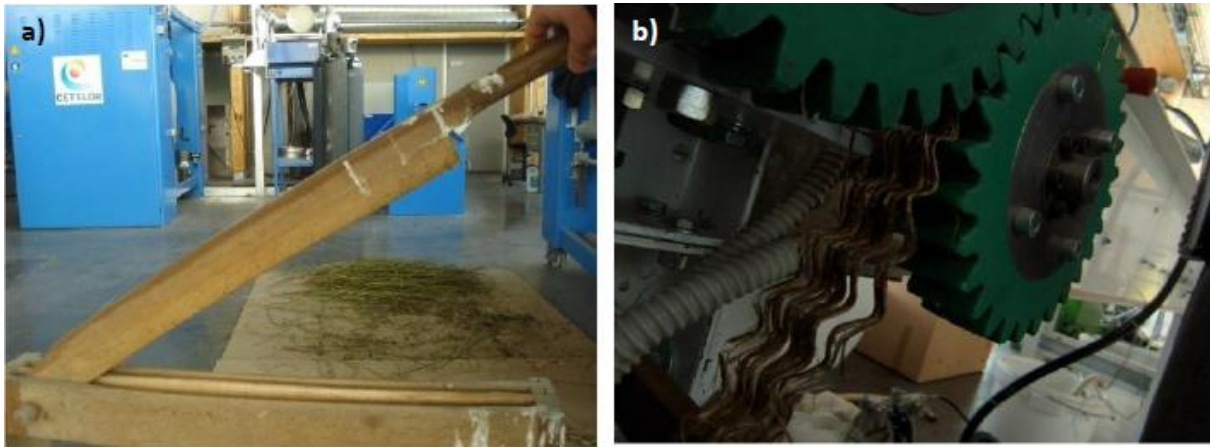
Broyage et battage, cette technique est plutôt utilisée pour extraire les fibres de lin ou de chanvre, les tiges sont prises par leurs extrémités et insérées dans le tilleul ou l'écang (instrument manuel à levier) si l'opération est manuelle, les tiges sont battues pour enlever le bois et cette opération est répétée jusqu'à ce que les fibres soient le plus souples possible, les morceaux de bois récupérés sont appelés les «anas», cette méthode ancestrale a été toujours effectuée manuellement avant de laisser la place aux machines.

Par ailleurs, il existe aujourd'hui des systèmes complètement automatisés qui engagent maintiennent et dégagent automatiquement les tiges sans aucune intervention humaine grâce à des systèmes de roues cannelées à grosses dentures (**Fig.II.1**), au début puis à plus fines denture par la suite, elles passent sous la cannelure des rouleaux avec un angle proche de 90° pour rendre le broyage plus efficace.

L'opération est effectuée successivement côté pied et côté tête, les fibres courtes appelées aussi étoupes moins résistantes, et les anas sont récupérées par aspiration et séparées [37,38].

Cette technique est améliorée si les tiges au départ sont dures et sèches, d'où la nécessité d'une étape préliminaire qui consiste à chauffer les tiges dans un four ou par un fumage.

Enfin, pour donner aux fibres obtenues un meilleur aspect, les faisceaux de fibres sont divisés et parallélisés par une opération de peignage et séparées selon leur longueur.



**Fig.II.1.** Ecang pour teillage manuel (a) cylindres cannelées pour teillage mécanique (b) [37,38].

### **1.2. Par déflexion**

L'extraction des fibres se fait par action combinée de grattage et de battage, les machines appelées «raspadors» (grattoir en langue espagnole) râpent les feuilles de la plante et libèrent les fibres, ces machines principalement constituées par un axe rotatif entraîné par un moteur sur lequel des supports maintiennent des batteurs en acier ont été fixés, les tiges insérées en amont de la machines 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 cribles, la distance qui sépare les lames est réglable en fonction du lot [39].

### **1.3. Par laminage**

Les tiges sont découpées en morceaux qui sont ensuite écrasés sous presse ou par laminage ou encore par combinaison des 2 traitements, ceci est effectué plusieurs fois de suite jusqu'à ce que les fibres soient le plus possible séparées [40].

#### **1.4. Par explosion à la vapeur**

L'explosion à la vapeur connue également sous l'appellation anglaise « steam explosion » parue en 1924, est un procédé thermomécanochimique qui permet la déstructuration de la matière lignocellulosique par l'action combinée de la chaleur issue de la vapeur, des hydrolyses induites par la formation d'acides organiques et du cisaillement résultant de la chute brutale de pression [41,42], le procédé est composé de deux phases distinctes:

- **Le vapocraquage:** cette première phase consiste à faire pénétrer la vapeur sous haute pression par diffusion à l'intérieur de la structure du matériau, la vapeur va ainsi se condenser et en présence d'une haute température va initier l'hydrolyse des groupements acétylés et méthylglucuroniques contenus dans les xylènes et dans certaines fractions galactomannanes, les acides organiques libérés augmentent l'acidité du milieu et catalysent la dépolymérisation de la lignine [43].

- **La décompression explosive :** Cette deuxième phase consiste à une chute brutale de pression ce qui va provoquer la vaporisation d'une partie de l'eau présente dans le matériau, cette expansion brutale de la vapeur d'eau va créer des forces de cisaillement assez importantes pour réussir un éclatement mécanique dans la structure du matériau.

Ces actions combinées vont selon les conditions modifier les propriétés physiques du matériau (surface spécifique, rétention d'eau, coloration, taux de cristallinité de la fraction cellulosique,...), améliorer l'hydrolyse des fractions hémi cellulosiques et induire des modifications dans la structure des lignines ce qui facilite leur extraction [44].

Tous ces procédés d'extraction mécanique souffrent de deux problèmes majeurs, le premier réside au niveau du risque élevé de chute de propriétés mécaniques des fibres suite aux sollicitations mécaniques qui peuvent être agressives et altérer les caractéristiques intrinsèques de fibre et ceci quel que soit le mode de séparation suivi, le deuxième étant le prix élevé des lignes d'extraction et leur encombrement [1].

#### **2. L'extraction chimique**

La méthode de l'extraction chimique permet d'éviter les inconvénients de l'extraction mécanique et surtout un gain de temps et d'énergie considérables, dans cette section nous présentons les principales méthodes d'extraction chimique des fibres végétales [39].

## **2.1. Procédé Kraft**

Ce procédé alcalin visant à éliminer la lignine, les pectines et les hémicelluloses sous l'action d'une solution d'hydroxyde de sodium (NaOH) et de sulfure de sodium (Na<sub>2</sub>S), ce dernier est un 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, lors de la cuisson le sulfure de sodium est hydrolysé en soude en NaHS et en H<sub>2</sub>S, les différents composés soufrés présents réagissent avec la lignine pour donner des thiolignines plus facilement solubles, la soude joue aussi un rôle de délignification qui s'associe à celui du sulfure et de ses dérivés, la liqueur appliquée au matériau est appelée liqueur blanche et la liqueur extraite du réacteur contenant les composés éliminés de la paroi est appelée liqueur noire [45].

## **2.2. Procédé au bisulfite**

Le procédé au bisulfite permet de séparer la lignine des fibres de cellulose en utilisant divers sels de l'acide sulfureux, les sels utilisés dans le processus de réduction sont en fonction du pH: des sulfites (SO<sub>3</sub><sup>2-</sup>) ou bisulfites (HSO<sub>3</sub><sup>-</sup>), il est basé sur la réaction sur la lignine de l'hydrogénosulfite de calcium, sodium, ammonium ou magnésium contenant de l'anhydride sulfureux libre, l'anhydride sulfureux est préparé par combustion à partir du soufre dans un excès d'air, le bisulfite est directement obtenu par réaction de l'anhydride sulfureux, le pH est situé entre 1.5 et 5 (sulfites ou bisulfites), la durée est entre 4 et 14 heures et la température de 130 jusqu'à 160°C qui sont aussi en fonction de la base utilisée [45].

## **2.3. Procédé acide**

Les composants non cellulosiques sont éliminés par l'action d'un acide de préférence fort tel que l'acide sulfurique qui transforme la lignine en acide lignosulfonique soluble, ou l'acide chlorhydrique qui grâce à ses ions chlorates, forme des chlorolignines solubles dans l'hydroxyde de sodium [1].

## **2.4. Procédé Soude-Anthraquinone**

Le procédé Soude-Anthraquinone ou Kraft-Anthraquinone utilise un catalyseur tel que les composés quiconque dont fait partie l'anthraquinone, de ce fait le temps de cuisson peut être réduit et le rendement en pâte augmenté, les propriétés de ces pâtes sont comparables à celles des pâtes kraft [1].

## **2.5. Procédé à la soude**

Ce procédé n'utilise que 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 extérieure de la tige de plante, la température, la pression, la concentration et la durée du traitement sont à définir en fonction du lot, l'âge et le type de la plante de telle façon à ne pas dégrader les fibres cellulosiques, il est conseillé de contrôler le pH de la solution et l'ajuster autour de 7, des réducteurs peuvent être rajoutés pour empêcher l'oxydation de la cellulose [1].

## **2.6. Procédé au sulfate neutre de sodium**

Les fibres sont extraites à l'aide d'une solution de sulfate de sodium avec de carbonate de sodium à une température de 170° à 180°C sous pression (en autoclave), les substances ligneuses sont ainsi délignifiées, sulfonées et dépolymérisées et les hémicelluloses sont dissoutes, les fibres cellulosiques sont alors libérées [46].

## **3. L'extraction biologique :**

### **3.1. Le rouissage à terre**

Le rouissage est un procédé naturel destiné à favoriser l'extraction des fibres, il consiste à étaler les tiges (de lin par exemple) dans un champ après sa récolte, à fin de bénéficier de l'action combinée du soleil et de la pluie ce qui va favoriser le développement de microorganismes capables de dissocier les éléments non cellulosiques de la partie fibreuse de la plante par élimination des liaisons qui les relient ensemble, cette opération peut durer 6 à 8 semaines en fonction de la météo, malgré l'efficacité de cette méthode, elle connaît plusieurs handicaps qui résident dans sa dépendance entière des conditions météorologiques, le moindre problème tel qu'un excès d'humidité ou un manque peut affecter directement la qualité des fibres obtenues, en effet si les tiges sont trop rouies, elles doivent être brûlées obligatoirement car elles pourrissent difficilement et lentement et favorisent ainsi l'éclosion de maladies pour la culture suivante ; si la récolte n'est pas assez rouie elle n'est pas transformable et donc invendable, un autre paramètre difficile à contrôler et qui nécessite un bon dosage, c'est le vent qui peut être à la fois un ennemi et un allié lors du rouissage, quand il souffle trop fort, les tiges sont emportées vers l'extrémité du champ mais il est nécessaire au séchage, c'est donc l'alternance des périodes de sec et d'humidité avec un vent léger qui favorise un bon rouissage, une autre difficulté de ce procédé est sa durée très longue, donc le rouissage à l'air est un procédé efficace si la météo est bonne mais qui reste très lent, par conséquent, c'est un procédé aléatoire [46].

### **3.2. Le rouissage à l'eau**

Ce type de rouissage repose sur le même principe de développement de micro-organismes que le rouissage à l'air, la différence est que les tiges (de chanvre par exemple) sont plongées 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 handicap majeur la pollution de l'eau .

En effet, le rouissage du lin et du chanvre très répandu au nord de l'Europe (France, Belgique, Pays Bas) s'effectuait traditionnellement en rivière avant qu'il soit interdit au début du 20<sup>ème</sup> siècle pour des raisons environnementales à cause de la décomposition bactérienne des bottes trempées au fond des rivières [1].

### **3.3. Par action microbienne**

Trois groupes d'agents microbiens sont capables de dégrader les composants non celluloseux 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, une qui possède une activité dépolymérase et une autre glycosidasique capables d'hydrolyser la chaîne principale et de couper les chaînes latérales en utilisant les oligosaccharides et les oses libérés, la deuxième possède uniquement une activité dépolymérase mais incapable d'utiliser les produits d'hydrolyse des hémicelluloses, enfin la troisième qui possède des activités glycosidasiques mais dépourvue d'activité dépolymérase, plusieurs espèces des protozoaires sont capables de dépolymériser les hémicelluloses ainsi que pour les substances pectiques, mais elles n'ont qu'une capacité limitée à utiliser les produits d'hydrolyse comme source d'énergie.

Concernant les champignons, ils sont capables de dépolymériser les hémicelluloses et d'utiliser les oligosaccharides et les oses libérés et de solubiliser partiellement la lignine, cependant, elles ne peuvent pas dépolymériser les pectines [39].

# **CHAPITRE III**

## **Tissage des renforts de composite**

## Introduction

Les structures tissées sont les plus répandues et les plus utilisées dans le domaine des composites sous forme des renforts fibreux, ces derniers peuvent être utilisés sous différentes formes, on peut distinguer l'échelle de la fibre (échelle microscopique), du fil (échelle microscopique) jusqu'aux préformés, (échelle macroscopique) : tissées, tricotes, tresses,...etc.

Les renforts assurent la résistance et la ténacité du matériau composite suivant leur géométrie et les structures fibreuses peuvent être classées en deux familles : préformes élaborées à partir de fibres discontinues ou à partir de fibres continues [47].

### 1. Le tissage

#### 1.1 Définition

Le tissage est un procédé de production de tissu dans laquelle deux ensembles distincts de filés ou fils sont entrelacés à un angle droit pour former un tissu, les fils verticaux sont appelés fils de chaîne et les fils horizontaux sont les fils de trame ou de remplissage, la méthode par laquelle ces fils sont tissés ensemble influe sur les caractéristiques de la toile [48].

#### 1.2. Début du tissage

Les premiers tissus connus datent de la préhistoire, à la fin du néolithique, les tisseurs préparent les fibres, et les cardent puis filent et tissent, les fils de chaîne sont tendus entre deux bâtons de bois enfoncés dans le sol, avec une perche, un fil de chaîne sur deux est tiré afin de créer un espace vide appelé la foule, où le fil de trame passe perpendiculairement aux fils de chaîne.

Les premiers métiers à tisser verticaux apparaissent la chaîne est alors tendue entre deux barres horizontales, le moyen pour passer le fil de trame dans la foule reste le même.

Pendant longtemps une navette se glisse à la main dans l'ouverture (**Fig. III.1**) [49].



**Fig. III.1.** Premier métier de tissage.

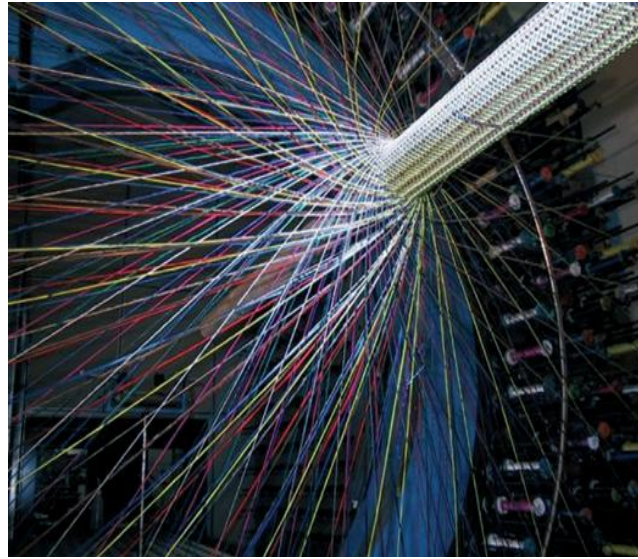
### 1.3. L'évolution du métier à tisser

De nombreux tisseurs ont participé à l'évolution technique du métier à tisser : Basile Bouchon vers 1725, Louis Falcon en 1728 puis Jacques Vaucanson en 1750 et 1760, ont tous contribué à améliorer son fonctionnement, c'est ensuite au tour du tisseur lyonnais Charles-Marie, Jacquard d'imaginer en 1801 la mécanique Jacquard, parfois appelée « Bistanclaque », le procédé permet de lever les fils de chaîne, qui sont reliés à des crochets, en actionnant une pédale. (**Fig. III.2**) [49].



**Fig. III.2.** Métier à la grande tire (Jacquard P).

L'arrivée de l'électricité au début du 20ème siècle a permis de remplacer les machines à vapeur par de gros moteurs électriques, La mécanisation du métier à tisser est pratiquement achevée à la fin des années 1940, la navette trop lourde et donc limitée en vitesse, est remplacée par un outil appelé « Projectile » à partir de 1945. Cette innovation est ensuite remplacée par une technologie encore plus simple c'est le métier à jet de fluides, qui permet de pousser le fil de trame entre les nappes par un jet d'eau ou d'air sous pression. C'est la technologie actuellement utilisée pour la production de masse (**Fig. III.3**) [50].



**Fig. III.3.** Nouvelles techniques de fabrication de tissus textiles 3D [51].

## 2. Matières premières de textiles

La matière est dite textile si elle permet la réalisation de fils, de feutre ou de non-tissés, elle se présente soit en élément de petite longueur sous forme de fibres de quelques mm à plusieurs cm, soit en élément continu de plusieurs centaines sous forme de filament de mètres).

La qualité des fibres va dépendre de :

- ✓ leur finesse ;
- ✓ leur longueur ;
- ✓ leur section ;
- ✓ leur composition chimique ;

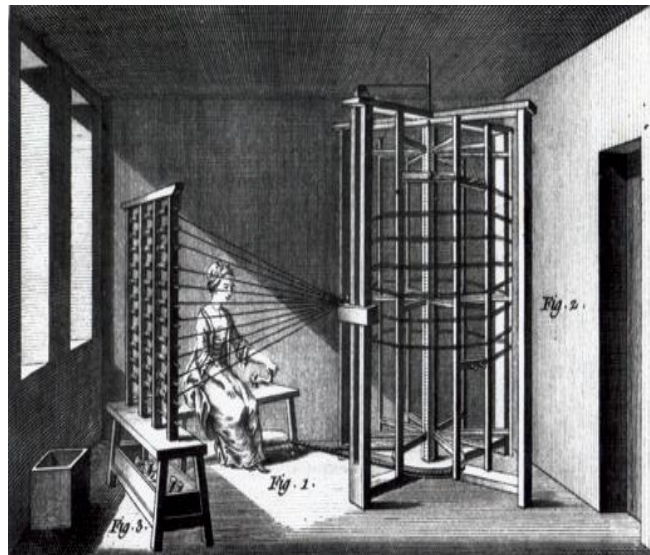
Il est possible de classer les matières en fonction de leur origine, il existe trois grandes familles de matières textiles [52] :

- ✓ Origine artificielle cellulose régénérée ;
- ✓ Origine synthétique produits chimiques transformé ;
- ✓ Origine naturelle végétale animale ;

## 2.1 Préparation des fils

Des nombre d'interventions mécaniques sont possibles pour donner aux fibres de la cohésion, de l'extensibilité du volume, de la structure (**Fig. III.4**), on peut citer :

- ✓ Le moulinage, qui consiste à tordre et / ou assembler deux ou plusieurs fils pour former qu'un seul plus solide, ainsi que le guipage qui consiste à enrouler un fil autour d'un autre fil support ;
- ✓ La texturation, qui consiste à augmenter le volume et parfois l'élasticité d'un fil en utilisant ses propriétés Thermoplastiques. [53]



**Fig. III.4.** Ourdissage vertical de fils [53].

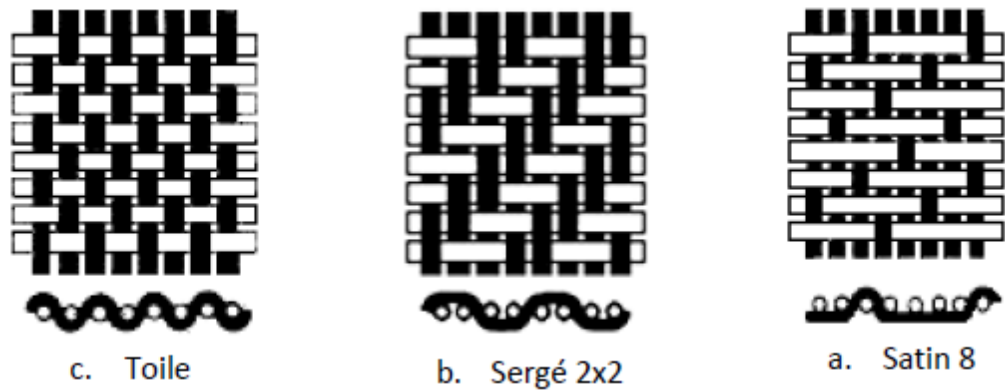
## 3. Les renforts

### 3.1. Tissés 2D

Les tissus bidimensionnels sont réalisés avec des métiers à tisser par l'entrelacement de fils de chaîne et de fils de trame, en fonction du mode d'entrelacement on obtiendra ce qu'on appelle communément une armure, qui peut se classer généralement en trois catégories

### 3.2. Classes des armures

Une armure est un mode de liage ou de croisement des fils, la (**Fig. III.5**) ci-dessous présente les trois armures les plus utilisées.



**Fig. III.5.** Les trois armures fondamentales du tissage [54].

Autour de ces armures de base et grâce à la variation du nombre de fils de chaîne et de trame et également la tension et la torsion appliquée aux fils de nombreuses armures sont créés.

**3.2.1. Toile ou taffetas :** chaque fil de trame passe successivement au-dessus puis en dessous d'un fil de chaîne, le fort entrelacement des fils donne à la toile une importante rigidité et une faible déformabilité.

**3.2.2. Sergé  $n m x$  :** chaque fil de trame passe successivement au-dessus de  $m$  puis en dessous de  $n$  fils de chaîne, les points de liage (c'est-à-dire les croisements où les fils de trame passent en dessous d'un fil de chaîne) successifs forment une diagonale, la variation des paramètres  $m$  et  $n$  permet d'obtenir des tissus avec des rigidités en cisaillement variable.

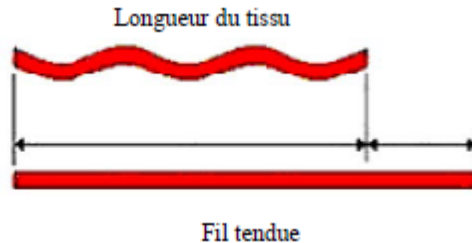
**3.2.3. Satin de  $n$  de décochement  $m$  :** chaque fil de trame passe au-dessus de  $(n - 1)$  puis sous un fil de chaîne, les points de liage consécutifs ne forment pas de diagonale et leur position est définie par le décochement  $m$ , cette armure est très souple et facilement déformable en cisaillement.

Le comportement d'un tissé dépend fortement de ses constituants et de la manière d'élaboration, on peut le caractériser par :

- ✓ Le type de fil (matériau, diamètre des fibres,...) ;
- ✓ L'armure ;
- ✓ La densité de fil (en fil/cm) pour chaque réseau ;
- ✓ L'embuvage qui caractérise l'ondulation des fils et s'exprime en pourcentage

(**Fig. III.6**) [55].

$$\text{Embuva}ge = \frac{\text{Longueur du fil} - \text{Longueur du tissu} \times 100}{\text{Longueur du tissu}}$$



**Fig. III.6.** Définition de l'embuva)ge [55].

### 3.3. Architecture de renforcement

Afin d'améliorer les caractéristiques mécaniques des structures en composites, il est nécessaire de jouer sur la texture des renforts (leur architecture) pour créer une charpente résistante adaptée aux contraintes mécaniques. En fonction des propriétés recherchées, on rencontre plusieurs architectures de renforcements (**Fig. III.7**).

#### 3.3.1. Unidirectionnelle

Les fibres sont orientées dans une même direction ; elles sont parallèles et peuvent se présenter sous deux formes : sans liaison particulière (roving), reliées par un fil (nappes).

#### 3.3.2. Multidirectionnelle aléatoire

Il est possible de fabriquer des composites avec des fibres disposées dans trois directions, par construction tous les composites sont fortement anisotropes, puisque la rigidité et la résistance des fibres sont de l'ordre de 50 à 100 fois supérieures à celles des résines.

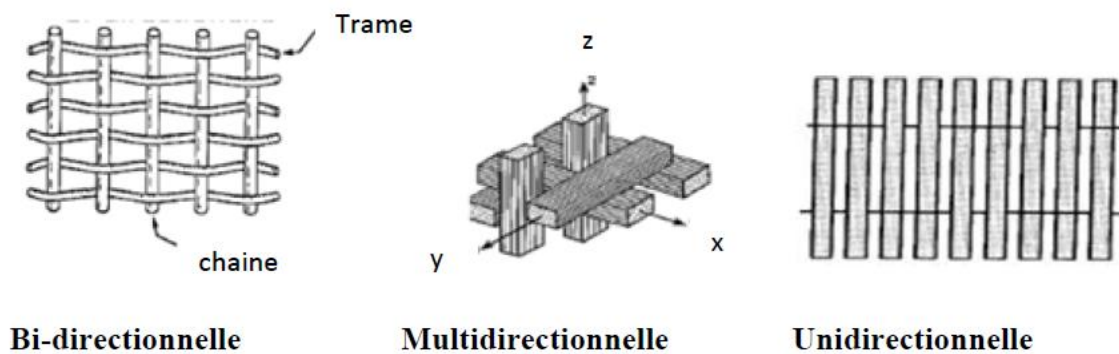
Elles peuvent se présenter sous les formes :

- ✓ Fibres coupées et broyées, sans arrangement particulier.
- ✓ Feutre de fibres agglomérées par un liant : le mat peut être à fibres courtes. (longueur inférieure à 50 mm), sans orientation particulière ou à fibres continues.

### 3.3.3. Orientée

Le tissu comporte des fils de chaîne ou de trame (fibres bidirectionnelles suivant le mode de croisement de la trame et de la chaîne, le tissu sera une toile, un sergé ou un satin.

On réalise également pour des applications particulières (aérospatiale, défense) des armatures de renforcements bi-ou tridimensionnelles, on réalise aussi des plaques ou coques dont la raideur et la résistance varient avec la direction de la sollicitation.



**Fig. III.7.** Principales orientations des fibres [56].

### 3.4. Tissés 3D

Afin de supporter des efforts plus importants, il est généralement nécessaire d'utiliser plusieurs plis de renforts de façon à consolider la structure fibreuse, ces différents plis peuvent être assemblés entre eux afin de renforcer leur cohésion par divers moyens mécaniques tels que le piquage ou la couture [57].

Les renforts 3D apparaissent alors comme une solution innovante à fort potentiel [58].

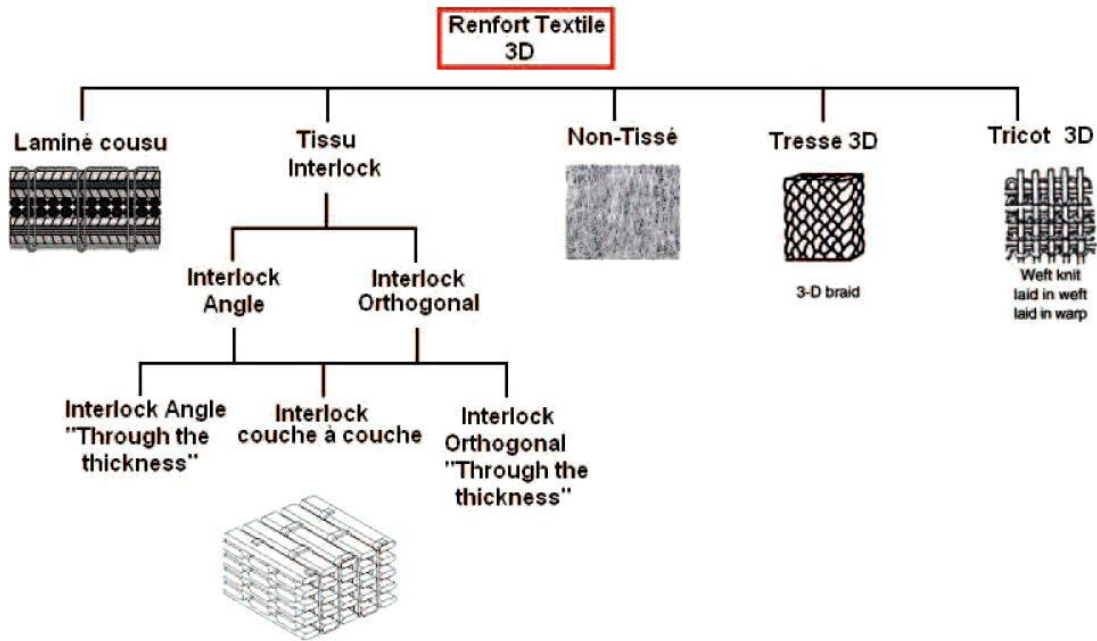


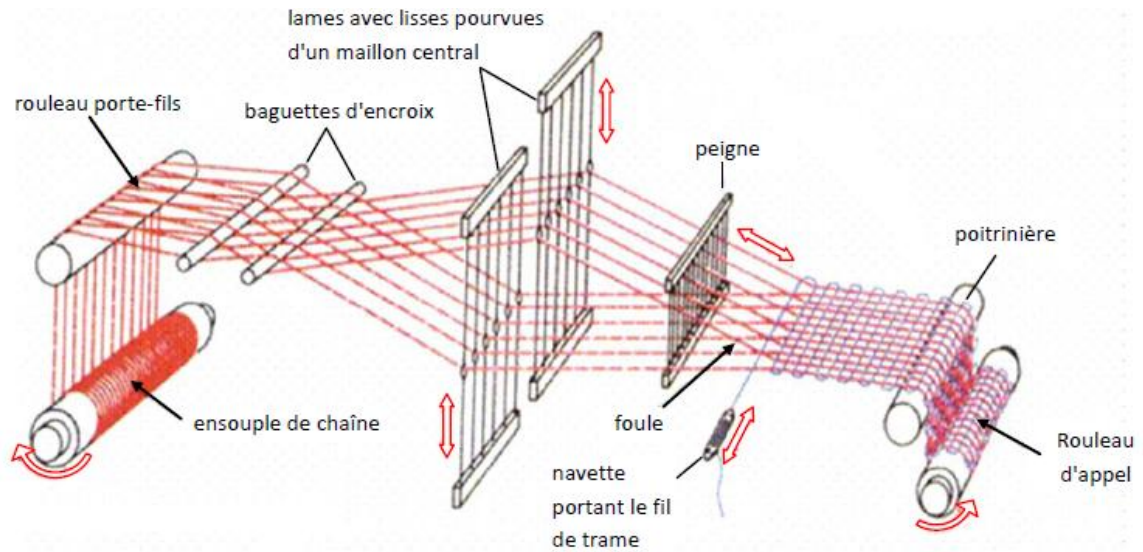
Fig. III.8. Classification des différentes structures textiles 3D [59].

### 3.4.1. Principe de base de la formation d'un tissu

La majorité des différents types de tissu sont formés dans une zone située entre un ensemble de fils de chaîne disposés parallèlement entre eux sur une ensouple avec une tension constante et un rouleau entraînant le tissu, deux opérations principales sont réalisées dans cette zone : une opération de sélection des fils de chaîne et une opération d'insertion de la trame.

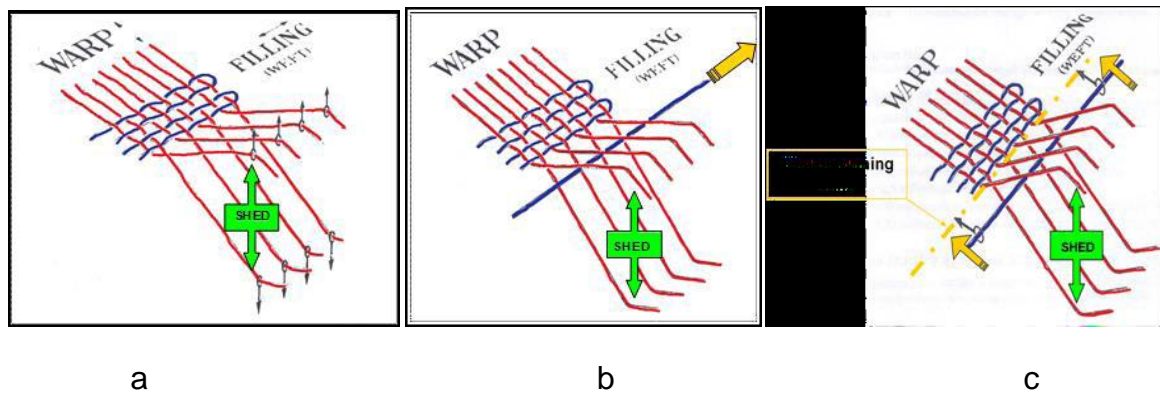
La façon dont le motif d'entrecroisement des fils se répète dans la structure définit «l'armure», donc les propriétés mécaniques du tissu dépendent en grande partie de cette armure [60].

La **Fig. III.9.** illustre le principe de fonctionnement d'un métier à tisser.



**Fig. III.9.** Schéma illustrant le principe de fonctionnement d'un métier à tisser [60].

Les différentes étapes de la formation du tissu se succèdent dans l'ordre d'apparition des figures suivantes et généralement en un tour d'arbre moteur.



**Fig. III.10.** Etapes de la formation d'un tissu ; (a) ouverture de la foule ; (b) insertion du fil de trame ; (c) Tassage du fil de trame.

Le tissage de deux fils orthogonaux respectivement la chaîne et la trame se réalise dans une zone précise du métier où la foule va s'ouvrir, le fil de trame va être inséré puis le peigne va se rabattre sur la ligne de formation du tissu.

La cinématique de la zone de formation du tissu (**Fig. III.10**) peut être décrite par ces trois

Grandes étapes :

- ✓ Étape 1 : Sélection de chaque lisse impliquant un mouvement des fils de chaîne dans deux positions (haut et bas) (**Fig. III.10 (a)**). l'angle obtenu entre ces deux nappes de fils de chaîne (supérieures et inférieures) donne la valeur de la foule.
- ✓ Étape 2 : Insertion du fil de trame à l'intérieur de la foule par l'intermédiaire d'un vecteur propre au métier (**Fig. III.10 (b)**).
- ✓ Étape 3 : Tassage du fil de trame contre le tissu déjà formé (point de façade), grâce à l'action du peigne (**Fig. III.10 (c)**). le point de façade représente l'intersection des nappes de fils de chaîne au niveau de la formation du tissu [61].

# **CHAPITRE IV**

## **Matériaux et méthodes**

## **Expérimentales**

## Préface

Pour optimiser la technique d'élaboration de composites renforcés par tissu combiné, une campagne des travaux effectuée sur le composite est menée suivant des paramètres fabrication d'un dispositif de tissage (métier à tissu) ;

- Tissage d'un tissu combiné alfa /jute;
- Découpage le tissu préparé ;
- Compression des plis de tissu fabriqué ;
- Elaboration de composite par moulage sous vide;
- Obtention des éprouvettes ;
- Caractérisation mécanique du composite ;

bien étudiés , pour cela, nous avons suivi les étapes suivantes :

### 1. Matériaux utilisés

Dans cette étude, nous avons utilisé trois composants essentiels :

- Matrice (résine thermodurcissable) ;
- Fibre d'Alfa;
- Toron de jute;

#### 1.1. Matrice

Les résines thermodurcissables ont des propriétés mécaniques élevées, ces résines ne peuvent être mises en forme qu'une seule fois, elles sont en solution sous forme de polymères non réticulées en suspension dans des solvants, les résines polyesters insaturées, les résines de condensation (phénoliques, aminoplastes, furaniques) et les résines époxy sont des résines thermodurcissables [62].

Dans ce travail, le matériau composite considéré comme un matériau à matrice thermodurcissable chargé par tissu mixte des fibres naturelles.

Les exemples de résines thermodurcissables classiquement rencontrées sont 914, 5208, 70, LY556 [62].

Les matériaux les plus performants ont des caractéristiques mécaniques élevées et une masse volumique faible, ses caractéristiques sont présentées dans le **tableau. IV**

**Tableau. IV.1.** Caractéristiques des résines thermodurcissables [62].

résines	$T_f$ (°C)	$\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )	$\epsilon_f^R$ (%)	$\sigma_f^R$ (MPa)	$\sigma_c^R$ (MPa)	E (GPa)
polyesters	60 à 100	1 140	2 à 5	50 à 85	90 à 200	2,8 à 3,6
phénoliques	120	1 200	2,5	40	250	3 à 5
epoxydes	290	1 100 à 1 500	2 à 5	60 à 80	250	3 à 5

### 1.2. Fibres 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 [1].

Dans ce travail nous avons utilisé des fibres d'alfa rouillé a l'eau pendant 24 jours et extrait a l'aide d'une brosse métallique puis sécher et agglomérés sous forme des touffes avec des mêmes poids (24g) et prête a l'utilisation a fin d'obtenir des tissus identiques.



**Fig. IV.1.** Touffe des fibres d'Alfa préparés.

### 1.3. Toron de Jute

La plante de Jute est cultivée au Bangladesh et en Inde, c'est une plante des régions tropicales appartenant à la famille des liliacées (**Fig. IV.2**), la tige peut atteindre une hauteur de 4 à 6 m avec un diamètre d'environ 3 cm. La fibre ultime est très courte et très lignifiée [63].



**Fig. IV.2.** Toron de jute préparé.

## 2. Fabrication d'un métier à tisser

Notre métier à tisser fabriqué consiste en un simple cadre de bois sur lequel on tend une série des fils (chaîne), on tire ensuite un fil de chaîne sur deux pour créer un espace vide ( la foule), où un autre fil appelé la trame, passe perpendiculairement sur les fils de chaîne .

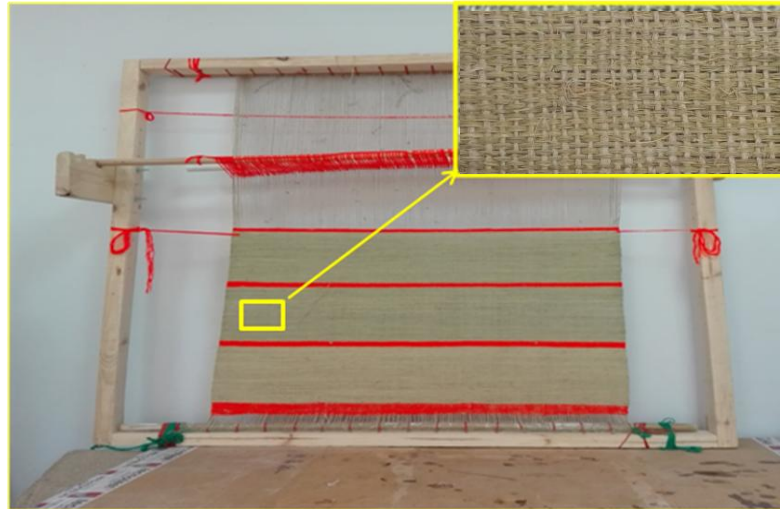


**Fig. IV.3.** Métier à tissu fabriqué.

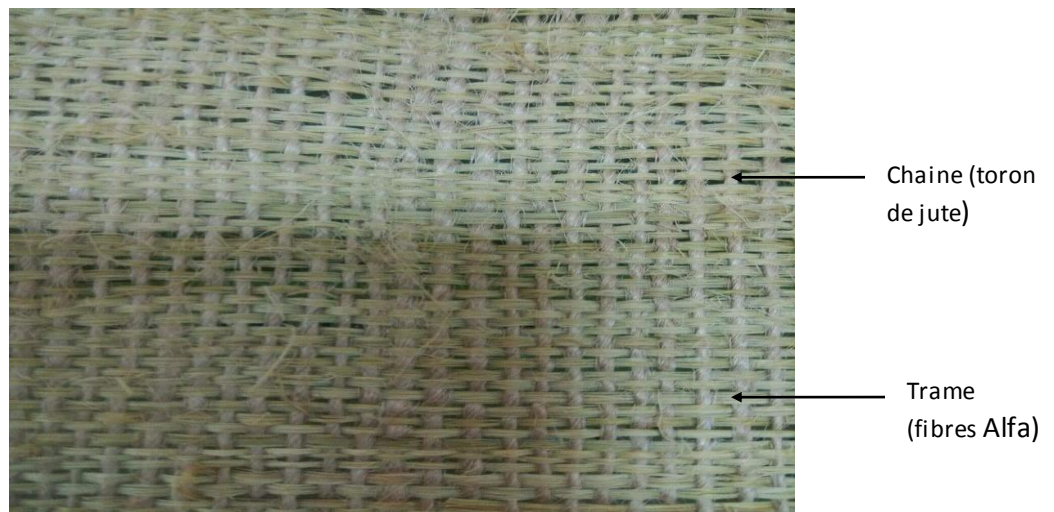
Notre métier à tisser il comporte deux barres ou ensouples entre lesquelles sont tendus les fils de chaîne, ces derniers sont maintenus solidaires du métier par l'intermédiaire de cordelettes d'extrémité qui passent dans les boucles des fils et sont directement attachées aux ensouples à l'aide d'un fil très résistant.

## 2.1. Tissage du tissu combiné alfa /jute

Le tissage est une étoffe formée par l'entrecroisement de deux ensembles de fils verticaux (chaine) et horizontaux (trame), il existe trois types de tissage : Toile (taffetas), sergé, satin, parmi ces types, nous utilisons le tissage de toile (taffetas) (**Fig. IV.4**).



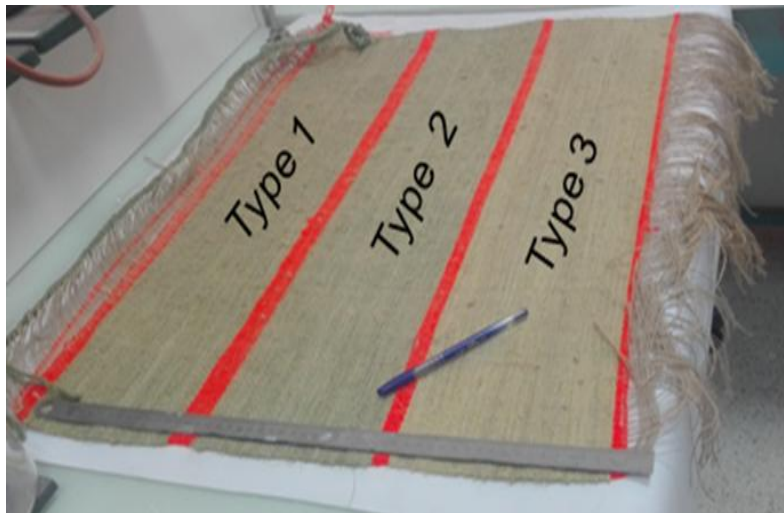
**Fig. IV.4.** Tissage bidirectionnels de la fibre Alfa /jute.



**Fig. IV.5.** Échantillon de tissu élaboré.

Les fibres d'Alfa, ont été effectuées en trois types:

- Type 1: Alfa non traité ;
- Type 2: Alfa traité à 5% NaOH pour 24 h;
- Type 3: Alfa traité à 10% NaOH pour 24 h;

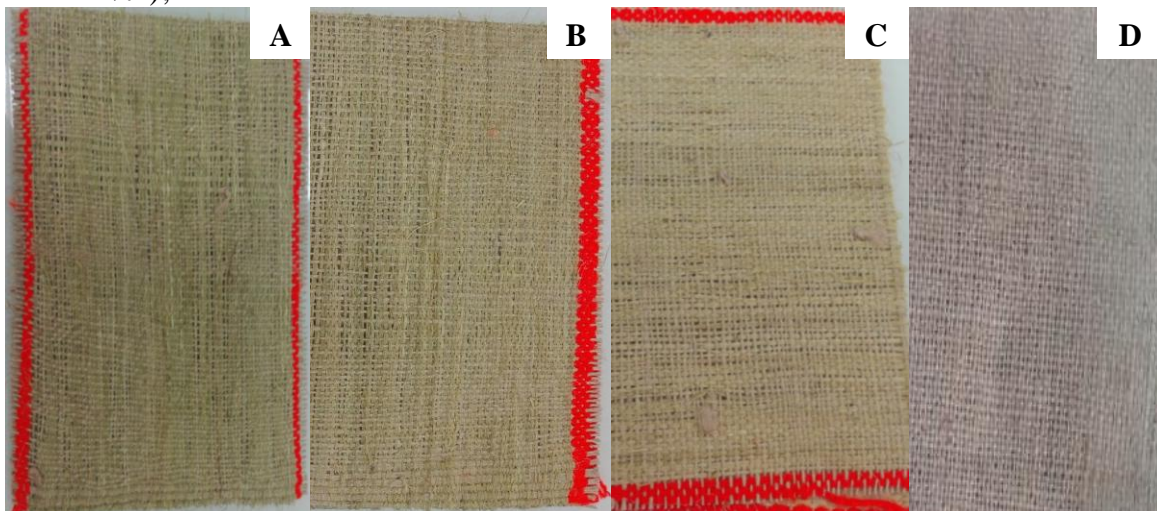


**Fig. IV.6.** Types de tissu Bidirectionnel élaboré.

### 3. Préparation du composite

#### 3. 1. Découpage du tissu

L'opération de découpage a été effectuée par un ciseau, disponible au niveau de laboratoire de moulage suivant des cotations bien définies (160 mm X 180 mm), (**Fig. IV.7**);



**Fig. IV.7.**Présentation des tissus découpé :**A**: jute / Alfa non traité ; **B**: jute / Alfa traité 5% NaOH ; **C**: jute / Alfa traité 10% NaOH ; **D** Jute /jute .

L'opération de pesage a été effectuée à l'aide d'un bascule de marque KERN avec précision de 0,001 g,

#### 3.2. Compression des tissus

Avant l'élaboration, les plis de tissus sont compressés par une presse à chaud (**Fig. IV.8**), cette technique nous à permet de :

- ✓ éliminer les ondulations de tissu ;

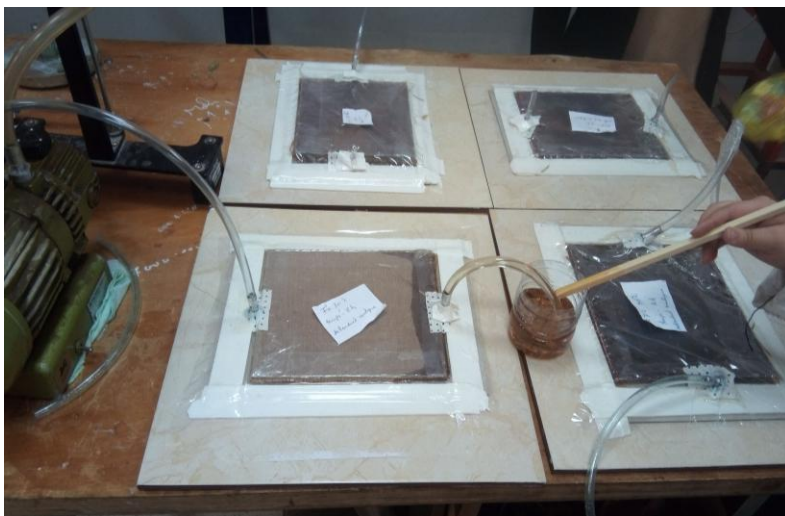
✓ réduire l'épaisseur des plis pour un tissu composite idéal ;  
chaque deux plis de tissu compressés à 80°C durant 10 mn avec pression 5 bar.



**Fig. IV.8.** Machine manuel de compression simple.

### **3.3. Procédé de mise en œuvre de composite**

Dans ce travail deux couches de tissu composite supposé et confondu similaire dans le moule préparer, la pompe sous vide a exercé une pression d'aspiration qui permet de supprimer l'aire existant dans le moule et assurait un bon écoulement de résine polyester à travers le tissu combiné jusqu'à la polymérisation (**Fig. IV.9**).

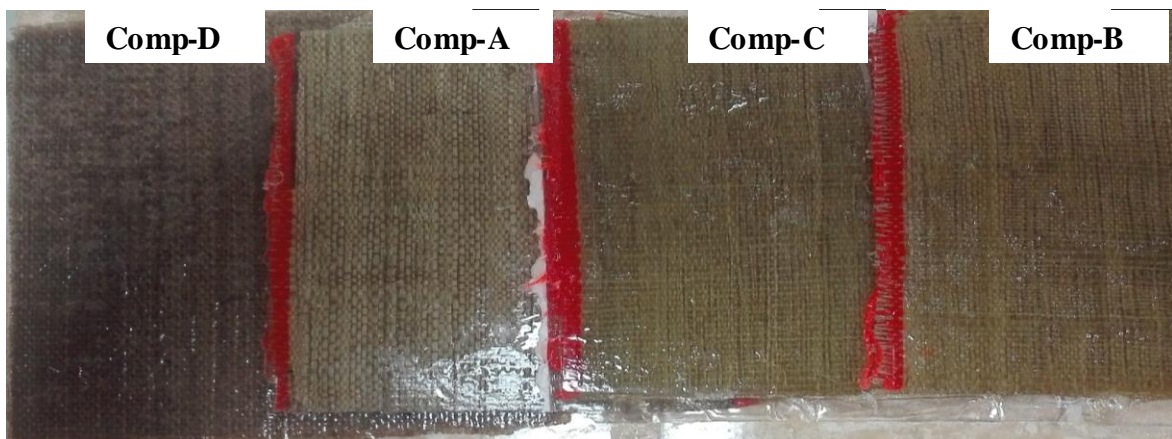


**Fig. IV.9.** Tissu mise en moulage sous vide.

Par cette méthode, nous avons élaboré quatre classes de composite combiné (**Fig. IV.10**) :

N	Résine	Renfort	Désignation
01	Polyester	Tissu combiné Jute /Alfa non traité	<b>Comp-A</b>
02	Polyester	Tissu combiné Jute /Alfa traité à 5% NaOH	<b>Comp-B</b>
03	Polyester	Tissu combiné Jute /Alfa traité à 10% NaOH	<b>Comp-C</b>
04	Polyester	Tissu jute non traité	<b>Comp-D</b>

**Tableau. IV.2.** Désignation des composites obtenue après moulage.



**Fig. IV.10.** Présentation des composites obtenue après moulage sous vide ;

**3.4. Mise à l'étuve :** après l'opération d'obtention de nos échantillons par moulage sous vide, nous avons mis les composites à l'étuve à fin de bien sécher à une température de 60°C durant 06 heures (**Fig. IV.11**).



**Fig. IV.11.** Etuve de séchage.

## 5. Pesage des échantillons de composite

Le pesage des échantillons est présenté suivant le tableau illustré sous dessous, ainsi le calcul de taux de tissu dans le composite suivant la relation :

$$W_f \% = \frac{W_j}{W_m + W_j}$$

Avec  $W_j$  : poids de tissu combiné ;  
 $W_m$  : poids de matrice ;

## 4. Obtention des éprouvettes

Les tests sur notre composite ont été exercés sur des éprouvettes de traction et de flexion selon la norme ASTM D 3039/D 3039M [64].

Les éprouvettes sont obtenues par découpage sur machine tronçonneuse (Fig. IV.12) ;



Fig. IV.12. Machine de découpage des éprouvettes.

Les éprouvettes obtenues sous forme parallélépipède qui sont présentées par là Fig. IV.13.

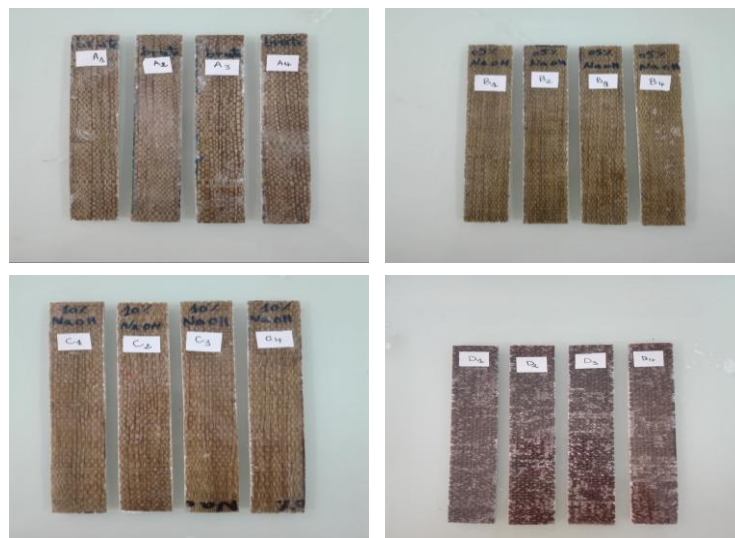


Fig. IV.13. Présentation des éprouvettes obtenues.

## 5. Essais de traction :

Les essais de traction sont des expériences mécaniques exécutées dans le but de déterminer les caractéristiques mécaniques de nos composites, ces essais réalisés portent sur 4 échantillons d'éprouvettes normalisées élaborés par moulage sous vide et qui ont été étirés suivant la direction des fibres d'Alfa jusqu'à la rupture à température ambiante, la vitesse de déplacement utilisée est de l'ordre de 1 mm/min. Les caractéristiques des éprouvettes utilisées sont les suivantes : longueur : 150mm, largeur : 25mm et d'épaisseur : 3mm (ASTM D3039), ces tests ont été réalisés à l'université de BISKRA (laboratoire de génie mécanique) sur une machine d'essais de traction / flexion de type INSTRON 5969 machine /50 kN) (Fig. IV.14).



**Fig. IV.14.** Machine de traction /flexion. INSTRON 5969 \_50 kN.

### 5.1. Paramètres d'études traction :

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

#### 5.1.1. Contrainte de rupture

La contrainte de rupture est donnée par la relation suivante [56] :

$$\sigma = F/S$$

Avec :

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

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

$\sigma$  : Contrainte de rupture (MPa)

### 5.1.2. Module de Young [66] :

Le module d'Young est le facteur de proportionnalité entre la contrainte  $\sigma$  et la déformation  $\varepsilon$

$$\varepsilon = \Delta L / L_0$$

$$E = \sigma / \varepsilon = (F * L_0) / (S * \Delta L)$$

Avec :

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

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

**S<sub>0</sub>**: Surface ou section (mm<sup>2</sup>).

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

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

## 6. Essais de flexion :

Les essais mécaniques de flexion ont été réalisés sur l'appareil de marque INSTRON 5969 machine /50 kN) ( **Fig. IV.14**).

Les essais réalisés portent sur 3 échantillons d'éprouvettes normalisées élaborés par moulage sous vide. La vitesse de déplacement utilisée est de l'ordre de 1 mm/min.

Les caractéristiques des éprouvettes sont les suivantes : longueur : 60mm, largeur : 10mm et d'épaisseur : 3mm (ASTM D3039).

### 6.1. Paramètres d'études flexion :

Les caractéristiques mécaniques déterminées par l'essai de flexion est [67]:

$$\sigma = \frac{3PL}{2be^2}$$

$$E = \frac{L^3 m}{4be^3}$$

Avec : **P** : la force appliqué ;

**b** : largeur ;

**L** : la distance entre appuis ;

**e** : épaisseur ;

$$m = \frac{\Delta F}{\Delta Y}$$

**m** : la pente de la tangente à la partie rectiligne initiale de la courbe de charge déplacement ;

# **CHAPITRE V**

## **Résultats et discussions**

## Préface

Dans ce chapitre, les résultats expérimentaux obtenus sur les différents matériaux composites sont présentés et interprétés. Au premier lieu, une analyse comparative entre les quatre types de composites sollicités en traction statique est discutée. Ensuite, les mêmes matériaux sont soumis à la flexion trois points pour une étude comparative secondaire. Les différents paramètres (contraintes à la rupture, module de Young et déformation) relatifs à ses tests sont présentés et discutés en fonction du type du renfort et/ou traitement des fibres.

### 1. Propriétés mécanique de traction

#### 1.1. Analyse des courbes ( $\sigma$ , $\epsilon$ )

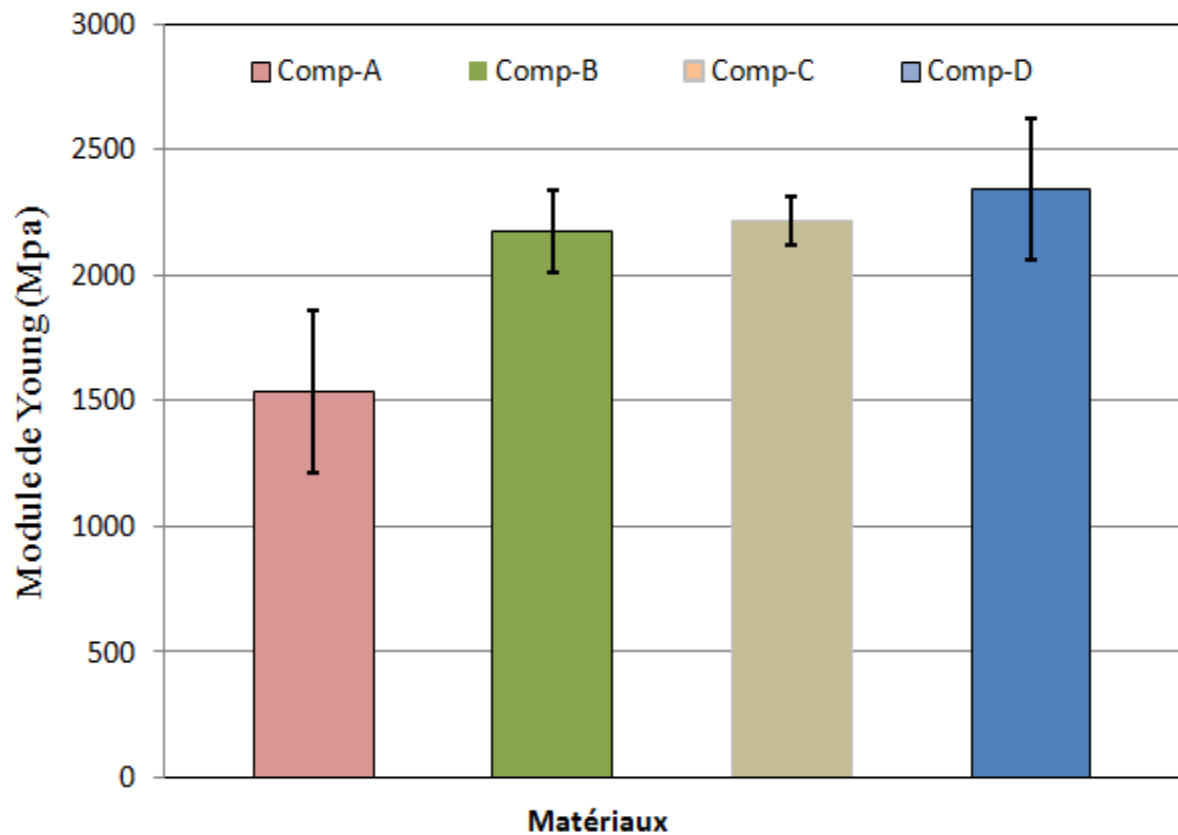
Les résultats des tests en traction statique des quatre type de composites ( **Comp-A**, **Comp-B**, **Comp-C** et **Comp-D**) sont discutés dans ce paragraphe. Dans les quatre cas étudiés, les matériaux Alfa/Polyester ou Jute/Polyester ont un comportement fragile (**Fig. V.1**). Chaque courbe progresse linéairement jusqu'à 1% à 1,5% de déformation puis un comportement contrôlé jusqu'à la rupture fragile des composites.

De plus, et selon la même **Figure. V.1**, le matériau **Comp-D** enregistre la meilleure valeur en traction (résistance à la rupture  $\sigma = 40,78 \pm 1,37$  MPa) et une déformation  $\epsilon = 0,03 \pm 0,001$ , Alors que les deux matériaux **Comp-B**, **Comp-C** semble avoir des valeurs assez proches  $\sigma = 23,00$  MPa de même pour la déformation  $\epsilon = 0,02$ . Enfin, le matériau **Comp-A** enregistre les valeurs les plus bases (résistance à la rupture  $\sigma = 19,86 \pm 2,79$  MPa et  $\epsilon = 0,016 \pm 0,001$ ) comparé aux autres matériaux. L'amélioration des paramètres de rupture des deux matériaux **Comp-B**, **Comp-C** est de 17% par rapport au matériau **Comp-A**, cette amélioration semble se traduire par l'effet du traitement des fibres Alfa par la solution NaOH.

#### 1.2. Analyse des modules de rigidité des différents matériaux

L'histogramme de la **Figure .V.2** représente les valeurs du module de rigidité pour les différents matériaux d'étude. Il est claire que le matériau Polyester/Tissu de Jute (**Comp-D**) montre la rigidité la plus élevée ( $E= 2345,1 \pm 550,804$  MPa), suivie par les deux matériaux **Comp-C** et **Comp-B** avec un module de  $E=2219,93 \pm 94,41$ MPa et  $E= 2176,39 \pm 163,29$  MPa respectivement. Alors que nous notons que le matériau Polyester

/Tissu Alfa/Jute (**Comp-A**) a montré une rigidité inférieure à celles des composites mentionnés précédemment.



**Figure V.2.** Evolution des modules de Young des composites.

Plusieurs techniques de modification de surface des fibres naturelles ont fait l'objet de nombreuses citations dans la bibliographie [68, 69,70]. Rokbi et al [71], ont montré que le processus d'alcalinisation affecte les fibres naturelles et apporte une nette performance vis à vis la qualité de l'adhérence fibre-matrice. Dans notre cas, le traitement par la solution NaOH avait augmenté la surface de contact fibre/résine (**Figure V.3**).

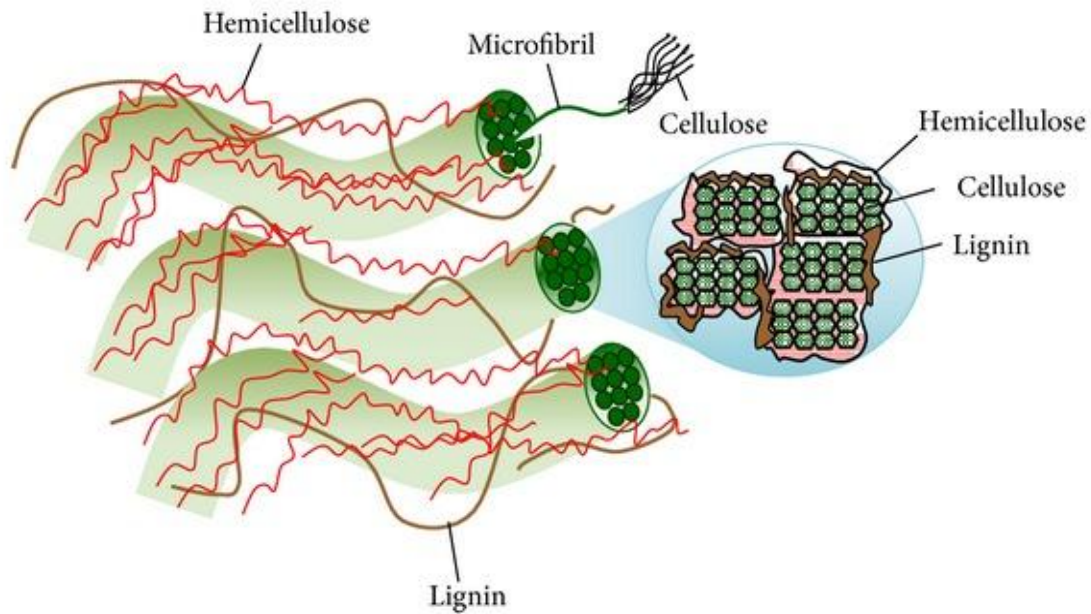


**Figure V.3.** Changement de la morphologie de la surface de fibres Alfa suite au traitement Alcalin (a): non traitée, (b): traitée [71].

La **Figure V.3** a, révèle la nature rugueuse de surface de la fibre non traitée. Cette rugosité se caractérise par une distribution inégale. Cela peut être attribué aux composants non cellulosiques (substances cireuses, huiles et impuretés) [71]. La morphologie de la fibre traitée change avec la concentration alcaline et/ou la période du traitement. La surface devient relativement lisse et le changement de la rugosité est très net (Fig.3b). La couleur des fibres traitées change et a tendance à devenir jaunâtre. Cette différence est due à la dissolution d'une majeure partie des composants de cimentation comme l'hémicellulose et la lignine. Le module de traction augmente avec la concentration de la solution de traitement NaOH. Le traitement alcalin élimine une certaine quantité de lignine, de cire et d'impuretés qui recouvrent la surface externe des fibres (**Figure V.4**). Le traitement par l'hydroxyde de sodium (NaOH) de la fibre favorise l'ionisation du groupe hydroxyle de l'alcoolate selon la formule :



Ainsi, le traitement alcalin influence directement sur les fibrilles et le degré de polymérisation de la cellulose. Il favorise aussi l'extraction de la lignine et l'hémicellulose (**Figure V.4**).



**Figure V.4.** Composition chimique d'une fibre végétale

Dans notre cas, le traitement alcalin à renforcer la liaison matrice Polyester / Tissu Alfa/Jute ce qui se traduit par les valeurs élevées des composites **Comp-B** et **Comp-C** avec un module de  $E= 2176,39\pm 163,29$  MPa et  $E=2219,93\pm 322,40$  MPa respectivement. Cette amélioration est de l'ordre de 30% par rapport au composite **Comp-A** (Polyester /Tissu Alfa non Traitée/Jute).

### 1.3. Analyse des contraintes de rupture des différents matériaux

L'histogramme de la (Figure V. 5) représente les valeurs de la contrainte des différents matériaux composites obtenues. D'après cette Figure, le matériau composite (**Comp-D**) reflète toujours et d'un écart important la bonne résistance par rapport au trois autres composites ( $\sigma = 40,87$  MPa). Cette différence dépasse l'ordre de 44%. La valeur importante de la contrainte du composite **Comp-D** se traduit par la résistance du toron de Jute qui est nettement supérieur) celui de la fibre Alfa. Ces grandeurs sont de l'ordre de :

Module de Young de la fibre Alfa  $E = 22$  GPa [72].

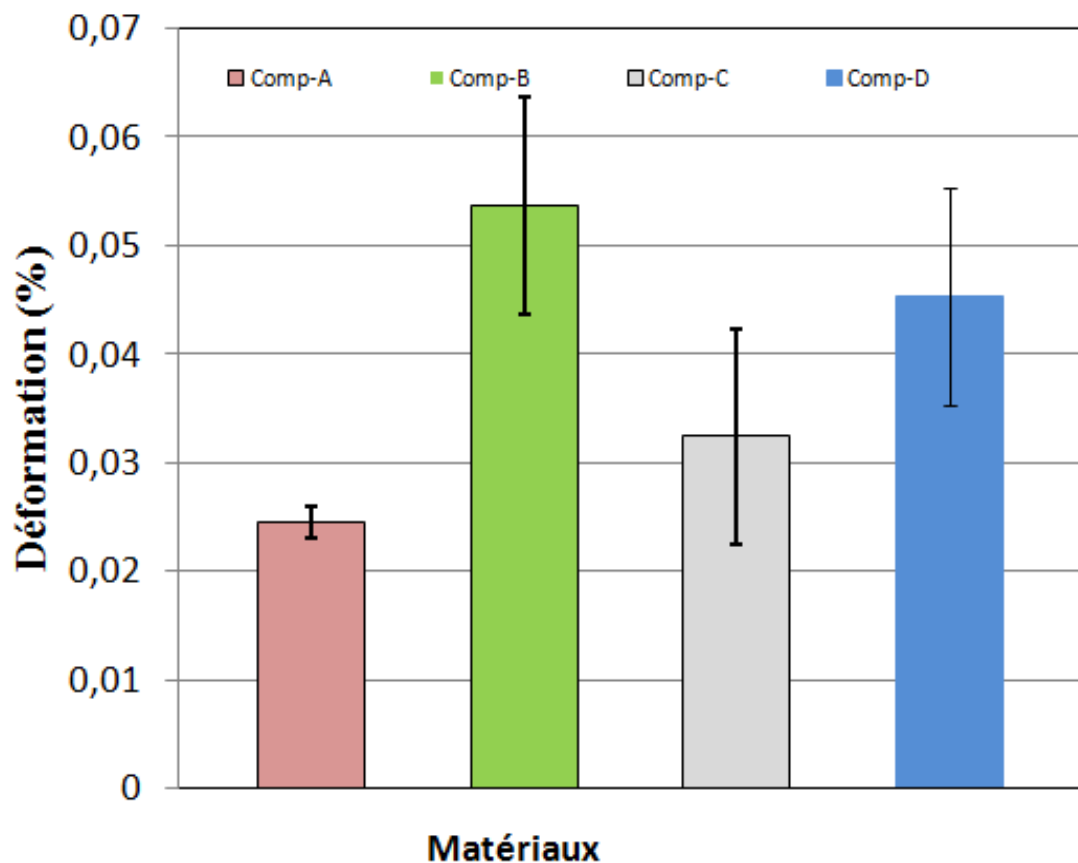
Module de Young de la fibre Jute  $E = 27$  GPa [73].

Alors que les deux matériaux **Comp-B**, **Comp-C** semble avoir des valeurs assez proches ( $\sigma = 23$  MPa) et le matériau **Comp-A** ( $\sigma = 19,86$  MPa).

La différence entre les contraintes enregistrées pour les matériaux traités et celle du matériau non traité peut s'expliquer par l'influence du traitement alcalin sur la fibre Alfa.

#### 1.4. Analyse des déformations de rupture des différents matériaux

D'autre part, les déformations à la rupture des composites sont présentées par l'histogramme de la **Figure V. 6**. De cette Figure, nous déduisons que le matériau **Comp-B** a la déformation la plus importante et qui est de l'ordre de ( $\epsilon=5\%$ ). Alors que les autres matériaux **Comp-D**, **Comp-C** et **Comp-A** ont des déformations assez inférieures soit ( $\epsilon=4\%$ ) et ( $\epsilon=3\%$ ) et ( $\epsilon=2\%$ ) respectivement.

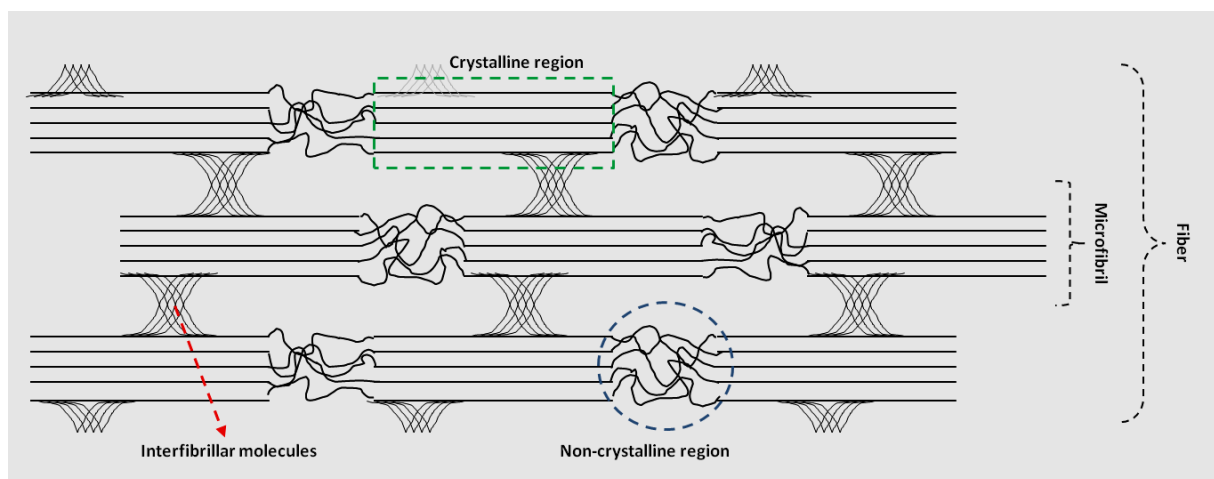


**Figure. V.6.** Evolution des déformations des composites.

## 2. Propriétés mécaniques en flexion

Cette partie vise à déterminer les performances des différentes composites. Les résultats des tests statiques selon la norme **ASTM-D 3039**, des différents matériaux testés sont représentés par la **Figure V. 8**. Cette Figure illustre les évolutions typiques de la contrainte en fonction de la déformation des éprouvettes de quatre composites sollicitées en flexion statique 3 points. D'après la **Figure V. 8**, le matériau composite **Comp- B** reflète des bonne performances ( $\sigma = 66,63\text{MPa}$ ) comparé aux autres matériaux. Ensuite se classe le matériau **Comp-D** ( $\sigma = 61,19\text{MPa}$ ) et **Comp-C** ( $\sigma = 52,001\text{MPa}$ ) et en fin le composite **Comp-A** ( $\sigma = 46,30\text{MPa}$ ).

Une amélioration du matériau **Comp- B** d'un ordre de 34% par rapport a celui renforcé par du tissu Jute /Alfa non traité. Cette amélioration est du fait que le traitement par la soude (NaOH) change la topographie de la surface des fibres, élimine la cire, la pectine, une partie de la lignine, et l'hémicellulose. En effet, l'élimination de ces composants est nécessaire car leur présence dans la constitution de la fibre (leur structure amorphe), ils conduisent à une résistance en traction plus faible. Le fait d'éliminer ces constituants, la fibre devient plus cristalline donc plus résistante (Figure V. 9).



**Figure V. 9** : Structure fine des fibres de cellulose.

## 2.1. Analyse des modules en flexion des différents matériaux

L'histogramme de la **Figure V. 10.** représente les valeurs du module de rigidité pour les différents matériaux testés. Il est clair que le matériau **Comp-B** montre la rigidité la plus élevée ( $E= 3,472\pm 0,087\text{GPa}$ ), suivie par les matériaux **Comp-C** ( $E=2,99\pm 0,33\text{GPa}$ ) et **Comp-D** avec un module de  $E=2,63\pm 0,12\text{GPa}$ . Et en fin le matériau **Comp-A** ( $E= 1,715\pm 0,039\text{GPa}$ ). Alors que nous notons que le matériau **Comp-A** a montré une valeur inférieure à celle des composites mentionnés précédemment.

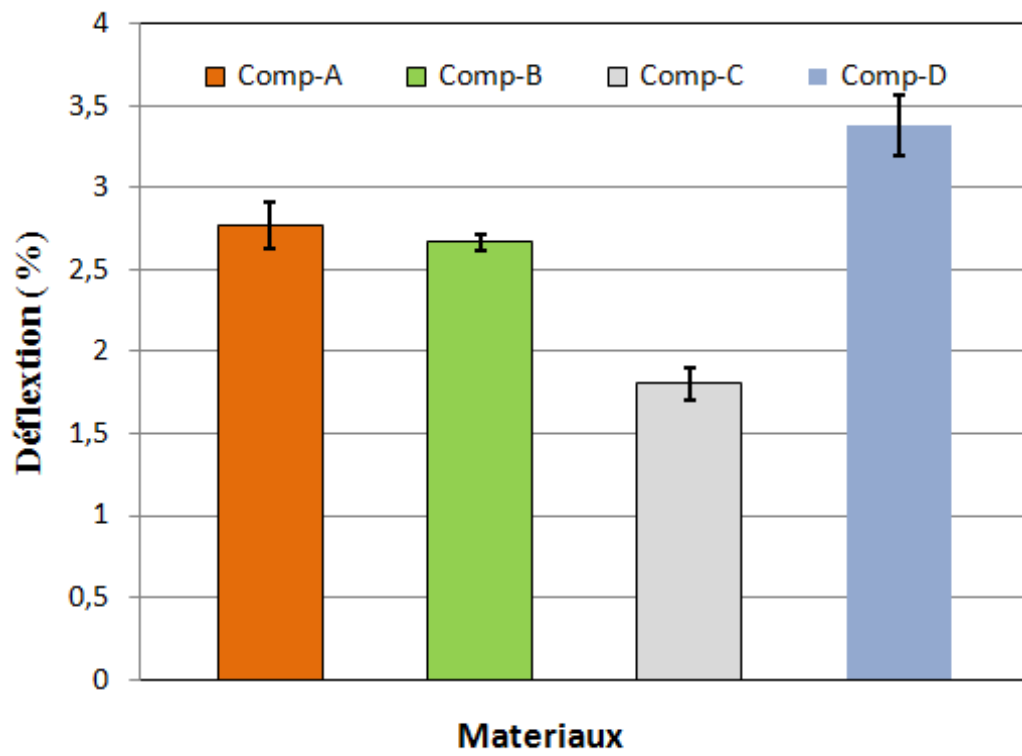
Comme déjà signalé dans le cas de la traction, le traitement alcalin conduit à une défibrillation de la fibre ce qui augmente ainsi sa surface spécifique, réduit le diamètre de la fibre et augmente le rapport d'aspect conduisant à l'élaboration d'une topographie de surface rugueuse, qui se traduit par une meilleure adhérence à l'interface fibre/matrice et une augmentation des propriétés mécaniques. C'est le cas observé pour le comportement des deux matériaux **Comp-B** et **Comp-C** qui reflète une bonne rigidité.

## 2.2. Analyse des contraintes de rupture des différents matériaux

D'après la **Figure V. 11,** le matériau composite **Comp-B** reflète toujours la contrainte la plus importante ( $\sigma = 64,19\pm 2,44\text{MPa}$ ) par rapport au matériau **Comp-D** ( $\sigma = 53,31\pm 7,88\text{MPa}$ ), cette différence est de l'ordre de 17 %. Et de 31% par rapport au matériau **Comp-C**. Alors que le matériau **Comp-A** a la valeur la plus basse ( $\sigma = 39\text{MPa}$ ).

## 2.3. Analyse des déformations des différents matériaux

D'autre part, les déflexions à la rupture des composites sont présentées par l'histogramme de la **Figure V. 12.** De cette Figure, nous déduisons que le matériau **Comp-D** a la déformation la plus importante et qui est de l'ordre de ( $\varepsilon=3,38\%$ ). Alors que les autres matériaux **Comp-A**, et **Comp-C** semblent avoir des valeurs assez proches ( $\varepsilon=2,60\%$ ) et **Comp-C** ont des déflexions assez inférieures soit ( $\varepsilon=1,80\%$ ).



**Figure. V.12.** Evolution de déflexion des composites.

## Conclusion Générale

L'objectif de ce travail vise le développement d'un tissu mixte (combiné) des fibres Alfa/Jute pour fabriquer des composites à base de ce tissu puis d'optimiser les caractéristiques mécanique en traction et en flexion des composites renforcés par divers tissu.

Les fibres Alfa constitue une richesse végétale la plus abondante en Algérie. Pour le renforcement de la matrice thermoplastique et thermodurcissable. Dans notre étude, ces fibres ont subi des traitements alcalins (NaOH), par conséquent, plusieurs constatations peuvent être dressé pour résumer l'effet du traitement alcalin sur le comportement statique des composites renforcés par de tissu combiné Alfa/Jute. Nous Présentons, ainsi, une série de conclusions de notre collaboration :

- ✓ Les tests en traction et en flexion statiques sur les composites Polyester /Alfa/jute et Polyester /Jute/jute reflètent un comportement linéaire fragile.
- ✓ Des améliorations nettement observées sont enregistrées par les matériaux composites à basse de tissu traité par la solution NaOH.
- ✓ Ces améliorations résultent du fait que le traitement par la soude (NaOH) change la topographie de la surface des fibres, élimine la cire, la pectine, une partie de la lignine, et l'hémicellulose.
- ✓ En effet, l'élimination de ces composants est nécessaire car leur présence dans la constitution de la fibre (leur structure amorphe), ils conduisent à une résistance en traction plus faible. Le fait d'éliminer ces constituants, la fibre devient plus cristalline donc plus résistante.
- ✓ En flexion, le matériau composite **Comp- B** reflète des bonnes performances ( $\sigma = 66,63\text{MPa}$ ) comparé aux autres matériaux. Ensuite se classe le matériau Comp-D ( $\sigma = 61,19\text{MPa}$ ) et **Comp-C** ( $\sigma = 52,001\text{MPa}$ ) et en fin le composite Comp-A ( $\sigma = 46,30\text{MPa}$ ).
- ✓ En traction, le matériau composite (**Comp-D**) reflète toujours un écart important de la bonne résistance par rapport au trois autres composites ( $\sigma = 40,87\text{MPa}$ ). Cette différence dépasse l'ordre de 44%. La valeur importante de la contrainte du composite **Comp-D** se traduit par la résistance du toron de Jute qui est nettement supérieur) celui de la fibre Alfa. Ces grandeurs sont de l'ordre de :

Module de Young de la fibre Alfa  $E = 22\text{GPa}$  [72].

Module de Young de la fibre Jute  $E = 27\text{GPa}$  [73].

En fin , nous espérons que notre travail trouvera une continuité au future.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] **Mohamed Dallel** (2012), Evaluation du potentiel textile des fibres d'Alfa (Stipa Tenacissima L):caractérisation physico-chimique de la fibre au fil .thèse doctorat en génie des Procédés, P5-Université de Haute Alsace, France .
- [2]**R.Casey et C.Grove** « Fibers »,Journal of Industrial & Engineering Chemistry, 39(10), pp.1213-1215 (October 1947).
- [3]**Troyes**,«Fibres et renforts végétaux Solutions composites », Fibres Recherche Développement (FRD),– France (Mars 2012).
- [4]**Bledzki, A.K.,Gassan, J**, "Composite reinforced with cellulose based fibers." Progress in Polymer Science, (1999). 24, p. 221-274.
- [5] **Sedan, D**, Thèse de doctorat, 2007, Etude des interactions physico-chimiques aux interfaces fibres de chanvre/ciment. Influence sur les propriétés mécaniques du composite, Université de Limoges.
- [6]**Daniel.J.R**, Cellulose, structure and properties, Encyclopedia of polymer science and engineering, Edition Wiley-Interscience Publication, (1987), 3, pp. 91-123.
- [7] **Pavithran. C and all**, Impact properties of natural fiber composites. J. Mater. Sci. (1987), 6, p. 882-884.
- [8] **English B, Youngquist. J A, Krzysik. A.M**, Chap 6: Lignocellulosic Composites. Ed Gilbert R.D Cellulosic polymer , blends and composites , Hanser publishers (NY), (1994), p. 115-130.
- [9] **Stamm. A.J**, Thermal degradation of wood and cellulose. Indus. & Eng. Chem, 1956.
- [10] **Kim D.Y, Nishiyama .Y, Wada. M, Kuga. S, Okano T**: Thermal decomposition of cellulose crystallites in wood. Holzforschung , (2001), 5, p. 521-524.
- [11] **S.K.Batra** « Other long vegetable fibers », In: Handbook of fibre Science and Technology, Ed. M.Lewin and E.M.Pearce, New York. Marcel Dekker, Vol. 4, Fibre Chemistry, pp. 505-575 (1998).
- [12] **P.S. Mukherjee and K.G.Satyanarayana** « Structure and properties of some vegetable fibers. II. Pineapple fibre. II.Pineapple fibre», Journal of Materials Science, Vol21, pp.51-56 (1986).
- [13] **C.Baley** «Fibres naturelles de renfort pour matériaux composites », Techniques de l'ingénieur (2005).
- [14] **A.Ishikawa, S.Kuga and T.Okano** « Determination of parameters in mechanical model for cellulose III fibre »,Polymer, Vol39, issue 10, pp. 1875-1878, (1998).

- [15] «Amiante», Wikipédia (Sourceélectronique), disponible sur:<http://fr.wikipedia.org/wiki/Amiante> (Novembre 2012).
- [16] « Amiante», Service de la santé et de la sécurité du travail – **Service du répertoire toxicologique**, Canada (Octobre 2004).
- [17] **Collectif** «Autour du Fil, l'encyclopédie des arts textiles», volume 10, Ed. Fogtdal, Paris (1990).
- [18] **A.Michud et B.Giustini** « Les fibres cellulosiques à usage textile », Mémoire, Cellule de veille technologique de grenoble INP-Pagora, École internationale du papier, de la communication imprimée et des biomatériaux (Mai 2009).
- [19] **J.M.Michel** «Contribution à l'histoire industrielle des polymères en France »,Société Chimique de France (Avril 2012).
- [20] **W.Killmann et L.T.Hong** « Le bois d'hévéa - succès d'un sous-produit agricole », Archives de documents de la FAO, volume 51 (2000).
- [21] **A.R.Urquhart and F.O.Howitt** «The structure of textile fibres: an introductory study», Ed. A.R.Urquhart et F.O.Howitt, Textile Institute, Manchester (1953).
- [22] **S.Taj, M.Ali Munawar and S.Khan** « Natural fiber-reinforced polymer composites », Proceedings of Pakistan Academy of Sciences, Vol 44(2) (Mars 2007).
- [23] **M.C.Paiva, I.Ammar, A.R.Campos, R.B.Cheikh et A.M.Cunha** « Alfa fibres: Mechanical, morphological and interfacial characterization », Composites Science and Technology, Vol 67, pp.1132-1138 (2006).
- [24] **J.Clavel**« Les principales fibres chimiques : généralités, constitution chimique, classification, propriétés techniques essentielles : méthode rapide de différenciation : exemples appliqués à la pratique courante », Ed. Société Chimique Elbeuvienne, "SYNTORGA" (1956).
- [25] « Nouvelles fibres textiles», Fiche Technologie-clé N°: 90, Version3, disponible sur <http://www.evariste.org>.
- [26] **G.G.Giménez** « Aportaciones a la química del esparto español ». Anales de la Universidad de Murcia. Vol 13, N° 1. Curso 1954-55.
- [27] **M.Rhanem** « L'alfa (Stipa tenacissima L.) dans la plaine de Midelt (haut bassin versant de la Moulouya, Maroc) –Éléments de climatologie », Physio-Géo [En ligne], Vol 3 (janvier 2009).

[28] **H.N.Le Houérou** « Considérations biogéographiques sur les steppes arides du nord de l'Afrique », Sécheresse, Vol 6, n° 2, pp. 167-182 (1995).

[29] « L'alfa: Importance écologique et socio-économique », Portail de l'agriculture marocaine, Terre et Vie, N°61-62, (Novembre 2002).

[30] **M.Benchrik** et **S.Lakhdhari** « Contribution à l'étude de l'entomofaune de la nappe alfatière de la région de Zaafrane.W.Djelfa », Mémoire de fin d'étude pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en agropastoralisme, Centre Universitaire ZIANE ACHOUR Djelfa (2002).

[31] **D.Nedjraoui** « Adaptation de l'alfa (*Stipa tenacissima* L) aux conditions stationnelles », Thèse de Doctorat, Université des Sciences et de la technologie Houari Boumediene USTHB, Alger (1990).

[32] **A. Moulay, K.Benabdeli** and **A.Morsli** « Contribution a l'identification des principaux facteurs de dégradation des steppes a *Stipa tenacissima* du sud-ouest Algerien », *Mediterranea*, Serie de estudios biológicos época II, n° 22, Universidad de Alicante (2011).

[33] Le site de la Société Nationale de Cellulose et de Papier Alfa <http://www.sncpa.com.tn>.

[34] **M.Ben Hassen** « Elaboration de non tissés à base de fibres d'alfa » disponible sur : [nonwoven.blogspot.fr](http://nonwoven.blogspot.fr).

[35] **S.Ben Brahim** and **R.Ben Cheikh** « Influence of fibre orientation and volume fraction on the tensile properties of unidirectional Alfa-polyester composite », *Composites Science and Technology*, Volume 67, Issue 1 (2007).

[36] **B.Vermeulen** « Réalisation de prothèses orthopédiques en fibres naturelles : Des matériaux composites de fibres de verre substitués par des composites de fibres d'Alfa », *Le Journal de l'Ecole Nationale Supérieure des Arts et Industries Textiles*, Fil d'Ariane N°:24 (Mai 2008).

[37] **R.G.Allaby, G.W.Peterson, D.A.Merriwether** and **Y.B.Fu** « Evidence of the domestication history of flax (*Linum usitatissimum* L.) From genetic diversity of the sad2 locus », *Theoretical and Applied Genetics*, Vol 112, no 1, pp. 58-65 (Décembre 2005).

[38] La culture et l'exploitation du lin disponible sur : <http://boiseau.free.fr/dossiers/lin/exploitationlinpdf.pdf>.

[39] **S.Msahli** « Etude du potentiel textile des fibres d'Agave Americana L. », Thèse de Doctorat, Université de Haute Alsace (Juillet 2002).

[40] **D.THI Vi Vi** « Matériaux composites fibres naturelles/polymère biodégradables ou non », Thèse de Doctorat, Université de Grenoble et Université des sciences de Hochiminh Ville (Juillet 2011).

[41] **K.Brecc, A.Vellar and W.G.Glasser** « Steam-assisted biomass fractionation I. Process considerations and economic evaluation » Biomass Bioenergy, Vol 14(3), pp.205- 218 (1998).

[42] **N.Jacquet, C.Vanderghem, C.Blecker and M.Paquot** « La steam explosion : Application en tant que prétraitement de la matière lignocellulosique » Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement, Vol 14(S2), pp.561-566 (2010).

[43] **X.F.Sun, F.Xu, R.C.Sun, Z.C.Geng, P.Fowler and M.S.Baird** « Characteristics of degraded hemicellulosic polymers obtained from steam exploded wheat straw », Carbohydrate Polymers, Vol 60, pp.15-26 (2005).

[44] **E.Chornet E and R.P.Overend** « Phenomenological kinetics and reaction engineering. Aspects of steam/ aqueous treatments » In: Proceedings of the International workshop on steam explosion technique: fundamentals and industrial applications, pp.21-58, Milan, Italy (October 1988).

[45] **C.Meirhaeghe** « Evaluation de la disponibilité et de l'accessibilité de fibres végétales à usages matériaux en France », Etude réalisée pour le compte de l'ADEME par Fibres Recherche Développement (Mars 2011).

[46] «Lincultivé», Wikipédia(Sourceélectronique), disponiblesur:[http://fr.wikipedia.org/wiki/Lin\\_cultivé](http://fr.wikipedia.org/wiki/Lin_cultivé) (Novembre 2012).

[47] **J.-M. Berthelot**, Matériaux composites - Comportement mécanique et analyse des structures, 3ème éd. P. 1999, p. 642 p.

[48] Revue procédés de tissage, CSMO .textile comité sectoriel de main d'œuvre de l'industrie textile .Québec .

[49] La Grande histoire des tissus, C. Lebeau , éd. Flammarion, 1998.

[50] L'évolution des techniques du filage et du tissage du Moyen-âge à la Révolution Industrielle, W. Endrei ,éd. Ehess, 1968.

[51] Cf. L'évolution du métier à tisser p.16 et La mécanique Jacquard p.17.

[52]Textiles techniques et fonctionnels, matériaux du XXIème siècle, Collectif sous la direction de Nadine Besse, Brigitte Riboreau et Guy Némoz , éd. IAC, 2009.

[53]**Daniel Weidmann** technologie des textiles de fibre 1 article 2 édition Dunod ,paris ;2009-2012 ISBN 978-2-10-057590-9.

- [54] Tissages d’hier et d’aujourd’hui, Jacques Anquetil , éd. Dessain et Tolra, 1985.
- [55] Armure tissage. [En ligne]. Disponible sur :<http://www.swannetoscar.com/univers-des-chemises-swann-et-oscar/chemises>.
- [56] **S. Clark and P. Wary**, “Méthode de conception d’un tissage composite 3D-Modélisation par éléments finis. Rapport de projet de fin d’étude.” Lyon, INSA de Lyon, 2004, 33 p.
- [57] **LAAREJ. M**, «Etude Par Spectroscopie Raman Et Modélisation D’une Résine Composite RTM », Thèse Doctorat, Tlemcen, 2010.
- [58] **A. P. Mouritz, K. H. Leong, and I. Herszberg**, A review of the effect of stitching on the in plane mechanical properties of fibre-reinforced polymer composites, Compos, Part A Appl. Sci. Manuf., vol. 28, no. 12, pp. 979–991, 1997.
- [59] **E.De Luycker**, “Simulation et expérimentation en mise en forme de renforts composites 3D interlocks,” LaMCoS , Lyon : INSA de Lyon, Thèse de doctorat,2009.
- [60] **B. Provost**, “Etude et réalisation d’une solution composite à renfort tissé interlock pour la protection balistique de véhicule,” thèse, Université de Valenciennes, 2013.
- [61] **Jérôme Vilfayeau**. Modélisation numérique du procédé de tissage des renforts fibreux pour matériaux composites. Matériaux. INSA de Lyon, 2014. Français. (NNT : 014ISAL0026). (tel-01153224).
- [62] **Laurent Gornet**. Généralités sur les matériaux composites. Engineering school. 2008. (cel-00470296v1).
- [63] **Ernst & Young**, «Étude de marché des nouvelles utilisations des fibres végétales», ADEME, décembre 2005.
- [64] **CARMA**, « Glossaire des matériaux composites renforcés des fibres d’origine renouvelable », centre d’animation régional en matériaux avancés, Décembre 2006.
- [65] **Nicolas Tessier- Doyen**, « Etude expérimentale et numérique du comportement thermomécanique de matériaux réfractaires modèles », L’université de limoges, 2003.
- [66] Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials.
- [67] Mechanical Properties of Pineapple Leaf Fiber-Reinforced polyester Composites **L. UMA DEVI,1, S. S. BHAGAWAN,2 SABU THOMAS1**; accepted 3 November

1996, School of Chemical Sciences, Mahatma Gandhi University, Priyadarshini Hills P.O., Kottayam-686 560, Kerala, India, (American Standard for Test Materials).

[68] Faulstich de Paiva JM., Frollini E., Unmodified and Modified Surface Sisal Fibers as Reinforcement of Phenolic and Lignophenolic Matrices Composites: Thermal Analyses of Fibers and Composites  
Macromol, Materialand, Engineering, 291,405-417, 2006.

[69] Rout J., Misra M., Tripathy SS, Nayak SK., Mohanty AK., The influence of fibre treatment on the performance of coir-polyester composites, Composites Science and Technology, 61, 1303–1310, 2001.

[70] Bledzki AK., Reihmane S., Gassan J., Properties and Modification Methods for Vegetable Fibers for Natural Fiber Composites, Journal of Applied Polymer Science, 59, 1329-1336, 1996.

[71] ROKBI ,H.OSMANI. L'effet des traitements de surface des fibres sur les propriétés mécaniques de composites Polyester-fibres Alfa. Laboratoire des matériaux non métallique (LMNM), UFAS, SETIF .b. Département de génie mécanique, Université de m'sila .Algérie .Septembre 2011.

[72] Mustapha MALHA. Mise en œuvre, caractérisation et modélisation de matériaux composites : polymère thermoplastique renforcé par des fibres de doum. Thèse de doctorat2013.

[73]. Florent ILCZYSZYN. Caractérisation expérimentale et numérique du comportement mécanique des agro-composites renforcés par des fibres de chanvre, Thèse de doctorat2013.