

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE De Technologie

DEPARTEMENT De Génie Mécanique

N° : .....



DOMAINE : Sciences et Technologies

FILIERE : Génie Mécanique

OPTION : Modélisation Numérique

**Mémoire présenté pour l'obtention  
Du diplôme de Master Académique**

**Par:** Amrou Ibtissam

Doucha Samira

**Intitulé**

**Etude expérimentale et numérique de effet  
d'orientation des fibres sur le comportement  
mécanique d'un bio-composite**

**Soutenu devant le jury composé de:**

Farsi Ch

Université M'SILA

Président

Rokbi. M

Université M'SILA

Rapporteur

Meddah. M

Université M'SILA.

Examineur

Latrache. M

Université M'SILA

CO- Rapporteur

**Année universitaire : 2016 /2017**

# **REMERCIEMENTS**

*Au terme de ce travail, tenons à exprimer notre gratitude et nos remerciements pour toutes les personnes qui ont contribué à sa réalisation.*

*Nous tenons tout d'abord à remercier Dr. Rokbi. M, Latrache. M et Bilouadah. Z, à département de génie mécanique de M'sila, pour son aide, ses conseils, son encouragement et sa disponibilité dans ce projet.*

*Nous présentons nos sciences remerciements à tous nos enseignements de génie mécanique de M'sila.*

*Nous profonds remerciements pour le membre de jury qui ont accepté d'évaluer ce travail.*

# DÉDICACE :

*Je dédie ce modeste travail à ce qui représente pour moi la source de la lumière qui éclaire mon chemin, ce qui sont pour moi le symbole de la tendresse. L'amour et l'espoir*

*Mon père et ma mère*

*Je dédie ce travail :*

*A mes frères Moussa et Adel et mes sœurs Fariza, Nabila, Massouda, Mayada, et Hayat toute ma famille proche et lointaine.*

*A mes amies Sid Ahmed, Ibtissam, Afaf, Marwa, Hoda, Asma, Zahra, Afifa, Kenza, Sabrina, Hanan, Widad, Radia, et Faiza.*

*A mes collègues de la promotion master 2 :2016/2017 de modélisation.*

*Doucha Samira*

# DÉDICACE :

*Je dédie ce modeste travail à ce qui représente pour moi la source de la lumière qui éclaire qui mon chemin, ce qui sont pour moi le symbole de la tendresse. L'amour et l'espoir*

*Mon père et ma mère*

*Je dédie ce travail :*

*A mes frères Samir, Issa, et Abd El Kadir et mes sœurs  
Marwa, et Safa*

*A mon oncle Ahmed.*

*A ma fiancé Aichouche Walid*

*A toute ma famille.*

*A mes amis.*

*A mes collègues de la promotion master 2 :2016/2017 de  
modélisation.*

*Amrou Ibtissam*

## SOMMAIRE

### INTRODUCTION GENERAL

#### Chapitre I : MATERIAUX COMPOSITE ET STRATIFIS

1. Introduction	
2. Définition matériaux composite.....	1
2.1. Matrices.....	2
2.1.1. Type de la matrice organique.....	2
➤ Thermodurcissables.....	2
➤ Thermoplastiques .....	2
2.2. Renfort.....	3
3. Matériaux composites stratifiés.....	4
3.1. L'orientation et Symétrie de stratifié.....	5
3.2. Type de stratifié .....	6
✓ Equilibré.....	6
✓ Symétrique.....	6
✓ Antisymétrique.....	6
✓ Croisé .....	6
✓ Hybride.....	6

#### Chapitre II : Composites thermoplastiques à fibre végétale

1. Introduction .....	7
2. Les matrices thermoplastiques .....	7
2.1. Propriétés mécaniques des matrices thermoplastiques .....	8
2.2. Mécanismes de déformation des polymères .....	9
3. Fibres végétales .....	10
3.1. Définition d'une fibre végétale .....	10
3.2. Classification des fibres végétales .....	10
3.3. Morphologie de la fibre végétale .....	11
3.4. Structure et composition des fibres naturelles d'origine végétale .....	12
a) Structure de la fibre végétale .....	12
b) Composition chimique des fibres végétales .....	13
3.5. Propriétés Mécaniques des Fibres Végétales .....	15
4. Avantages et inconvénients des fibres végétales .....	16

**Chapitre III : Comportement élastique d'un matériau composite orthotrope**

1. Loi De Hooke Pour Un Composite Orthotrope .....	17
1.1. Composite orthotrope .....	17
1.2. Généralités .....	17
1.3. Matrice de rigidité et de souplesse .....	18
2. Module de l'ingénierie .....	19
2.1. Traction dans le sens chaîne .....	19
2.2. Traction dans le sens trame .....	20
2.3. Traction transversale .....	21
2.3. Relation entre modules d'Young et coefficients de Poisson .....	21
3. Formulation des éléments finis .....	21

**Chapitre IV : Matériaux et méthode d'expérimentale**

1. Introduction .....	23
2. Matériaux utilisés .....	23
2.1. Matrice .....	23
2.2. Fibres de Jute .....	24
3. Préparation du stratifié .....	25
3.1. Choix des éprouvettes .....	25
3.2. Découpage .....	25
3.3. Compression des tissus Jute .....	26
3.4. Elaboration des stratifiés .....	26
3.4. Obtention des éprouvettes .....	27
4. Essais de traction .....	29
4.1. Essais de traction sur stratifié .....	30

**Chapitre V : Résultats et discussions**

1. Introduction .....	33
-----------------------	----

## SOMMAIRE

---

2. Caractérisations mécaniques .....	33
2.1. Analyse des courbes Charge - déplacement .....	33
2.2. Paramètres de rupture .....	33
3. Résultats de l'essai i de traction sur les stratifiés .....	34
<b>PARTIE NUMERIQUE .....</b>	<b>36</b>
1. Introduction .....	37
2. Définition d'ANSYS .....	37
3. Présentation d'ANSYS .....	37
4. Simulation par le code commercial ANSYS .....	38
4.1. Géométrie .....	38
4.2. Choix de l'élément type .....	39
4.3. Propriété des matériaux .....	40
4.4. Insertion des couches orthotropes .....	41
4.5. Maillage .....	42
4.6. Conditions aux limites .....	44
4.7. Application des charges .....	44
4.8. Solution .....	45

**Liste des tableaux**

<b>Tab II. 1.</b> Caractéristiques des thermoplastiques .....	8
<b>Tab II.2.</b> Différents thermoplastiques .....	9
<b>Tab II.3.</b> Propriétés morphologiques de quelques fibres végétales .....	12
<b>Tab .II.4.</b> Composition chimique de quelques plantes à fibres .....	15
<b>Tab II.5.</b> Propriétés mécaniques des fibres naturelles en comparaison avec des fibres de renforcement conventionnelles .....	16
<b>Tab II.6.</b> Principaux avantages et inconvénients des fibres végétales comme renforts dans les matrices polymères .....	16
<b>Tab .IV.1.</b> Caractéristiques de résine polypropylène(PP).....	23
<b>Tab IV.2.</b> Les différents stratifiés élaborés .....	25
<b>Tab IV.3.</b> Les conditions d'élaboration .....	27
<b>Tab V.1.</b> Caractéristiques mécaniques de l'essai de traction sur les stratifiés .....	34
<b>Tab V.2.</b> Caractéristiques mécaniques de PP/Jute .....	41

## Liste des Figure

<b>Fig.I.1.</b> Représentation d'un matériau composite .....	1
<b>Fig.I.2.</b> Types de matrices, EPDM : Un terpolymère éthylène-propylène-diène, SBR : Un copolymère styrène-butadiène, BR : Un polybutadiène .....	3
<b>Fig.I.3.</b> Architecture des renforts .....	3
<b>Fig.I.4.</b> Différentes formes de renforts tissés .....	4
<b>Fig.I.5.</b> Constitution d'un stratifié .....	4
<b>Fig.I.6.</b> Moitié d'un empilement $[0_2 / \pm 45_2 / 90_2]_s$ .....	5
<b>Fig.I.7.</b> stratifié équilibré. ....	6
<b>Fig.I.8.</b> stratifié symétrique .....	6
<b>Fig.I.9.</b> stratifié antisymétrique .....	6
<b>Fig.I.10.</b> stratifié Croisé $[0_2 / 90_2]_s$ .....	6
<b>Fig.I.11.</b> stratifié Hybride (V : verre, C : carbone) .....	6
<b>Fig. II.1.</b> Répartition des polymères utilisés dans les véhicules : les thermoplastiques PP, PE, PES, PA sont les plus utilisés d'après .....	7
<b>Fig. II.2.</b> Réponse caractéristique en traction d'un polymère thermoplastique semi- cristallin et évolution de la forme de l'éprouvette .....	10
<b>Fig. II.3.</b> Variation du diamètre le long de fibre de lin .....	11
<b>Fig. II.4.</b> Schéma des parois d'une fibre de jute .....	13
<b>Fig.II.5.</b> Modèle de description de la structure d'une fibre végétale.....	13
<b>Fig.II.6.</b> Exemple de représentation schématique de l'agencement des différents composants des fibres chanvre à l'échelle micrométrique.....	15
<b>Fig.III.1.</b> Couche de matériau composite orthotrope .....	19
<b>Fig.III.2.</b> Numérotation des nœuds de l'élément isoparamétrique à quatre nœuds.....	22
<b>Fig. IV.1.</b> Film de plastique en polypropylène (PP) recyclé .....	24
<b>Fig. IV.2.</b> Plante et fibre de Jute .....	24
<b>Fig. IV.3.</b> Tissu de Jute .....	24
<b>Fig. IV.4.</b> Matériaux utilisés : orientation des plis en jute : A) $[0_2 / \pm 45]_s$ , B) $[0_2 / 30]_s$ , C) $[0_2 / 55]_s$ D) $[0_4]_s$ , E) Plastique PP .....	25

<b>Fig. IV.5.</b> Les séquences PP/Jute utilisés lors de l'élaboration des stratifiés .....	25
<b>Fig. IV.6.</b> Représenté la compression des tissus de Jute .....	26
<b>Fig. IV.7.</b> Les place des défieront stratifiés. ....	27
<b>Fig. IV.8.</b> Un pré-échantillonnage des éprouvettes.....	27
<b>Fig. IV.9.</b> Éprouvette de traction .....	28
<b>Fig. IV.10.</b> Les étapes d'usinage d'éprouvette par CNC Les éprouvettes obtenues sont présentées par (Fig. IV.10) .....	28
<b>Fig. IV.11.</b> Les éprouvettes testent .....	29
<b>Fig. IV.12.</b> machine de test zwick /roell en traction .....	29
<b>Fig. IV.13.</b> L'essai de traction sur éprouvette .....	30
<b>Fig. IV.14.</b> Principe de l'essai de traction .....	31
<b>Fig. V.1.</b> Evolution de la contrainte en fonction de la déformation	
a) Polypropylène recyclée sans renfort, b) PP/Jute en traction .....	33
<b>Fig. V.2.</b> Histogrammes de l'évolution des allongements des stratifiés PP/Jute	
A)[0 <sub>2</sub> /±45] <sub>s</sub> , B)[0 <sub>2</sub> /±30] <sub>s</sub> ,C) [0 <sub>2</sub> /±55] <sub>s</sub> et D)[0 <sub>4</sub> ] <sub>s</sub> .....	34
<b>Fig. V.3.</b> histogrammes de l'évolution des contraintes des stratifiés PP/Jute	
A)[0 <sub>2</sub> /±45] <sub>s</sub> , B)[0 <sub>2</sub> /±30] <sub>s</sub> ,C) [0 <sub>2</sub> /±55] <sub>s</sub> et D)[0 <sub>4</sub> ] <sub>s</sub> .....	35
<b>Fig. V.4.</b> Histogrammes de l'évolution des allongements des <i>stratifiés PP/Jute</i>	
A)[0 <sub>2</sub> /±45] <sub>s</sub> , B)[0 <sub>2</sub> /±30] <sub>s</sub> ,C) [0 <sub>2</sub> /±55] <sub>s</sub> et D)[0 <sub>4</sub> ] <sub>s</sub> .....	35
<b>Fig. V.5.</b> Intégration des dimensions de l'éprouvette dans la basse ANSYS.....	39
<b>Fig. V.6.</b> Intégration des dimensions de l'éprouvette dans la basse ANSYS.....	39
<b>Fig. V. 7.</b> L'élément type SHELL181 choisie pour modéliser les couches orthotropes..	40
<b>Fig. V.8.</b> La commande d'insertion de l'élément SHELL 181.....	40

## Liste des figures

---

<b>Fig. V.9.</b> Insertion des propriétés mécaniques .....	41
<b>Fig. V.10.</b> Insertion des couches orthotropes .....	42
<b>Fig. V.11.</b> Maillage par défaut de l'éprouvette .....	43
<b>Fig. A.12.</b> Le maillage raffiné de la zone effective .....	43
<b>Fig. V.13.</b> Condition aux limites .....	44
<b>Fig. V.14.</b> Application des charges de 20KN ( a : schéma des nœuds, b : schéma du structure) .....	45
<b>Fig. V.15.</b> Choix de l'analyse statique .....	46
<b>Fig. V.16.</b> Lancement des calculs .....	46
<b>Fig. V.17.</b> Comparaison de l'état initiale et l'état finale de l'éprouvette .....	47
<b>Fig. V.18.</b> La variation de déformation selon (UX) .....	48

## Introduction General

Depuis l'apparition des premières pièces en résine renforcée de fibres de verre (vers 1940), les composites se sont énormément développés et impliqués dans de nombreux secteurs : aéronautique, automobiles, bâtiment... Toutefois face à des contraintes économiques et environnementales toujours plus exigeantes, l'utilisation de renforts cellulositiques (fibres végétales) dans les composites à matrice organique apparaît aujourd'hui comme une alternative de choix. L'intérêt pour ces fibres réside notamment dans leurs bonnes propriétés spécifiques : biodégradabilité, abondance, caractère renouvelable et faible coût. La recherche sur le sujet s'est ainsi fortement dynamisée au cours de ces dernières années et un certain nombre de produits commencent à apparaître sur le marché. De nouvelles applications et des composites plus performants sont déjà anticipés, mais les connaissances restent insuffisantes et des études doivent être menées afin de mieux comprendre certains mécanismes [1].

Les performances en termes de gain massique, de propriétés mécaniques et de fabrication offrent de nombreuses possibilités d'applications, parfois très complexes. Les activités de recherche propres à ces matériaux sont également très présentes dans les laboratoires du monde entier pour permettre de mieux comprendre le comportement des structures composites à travers de nombreux thèmes d'études, dans le but d'optimiser leur utilisation et leur adéquation avec l'application industrielle [2].

La difficulté en modélisation concerne principalement la prévision de la résistance de structures constituées de ce type de matériaux. En effet, les mécanismes d'endommagement et de rupture sont nombreux, interviennent à des échelles différentes et sont généralement couplés. Dans le cas d'un stratifié constitué de plis unidirectionnels, les premières fissures de la taille de quelques fibres et parallèles à la direction des fibres peuvent apparaître très tôt. Notons que ces fissures peuvent apparaître très tôt, particulièrement les ruptures transverses, et bien avant la rupture complète du stratifié.

Dans le cas d'un stratifié constitué de plis bidirectionnels, la description du phénomène d'endommagement, la caractérisation mécanique ainsi que l'analyse du comportement mécanique de ce type de stratifié devient plus complexe.

Dans cette perspective, des stratifiés à plis bidirectionnels à base de polypropylène renforcé par de tissus de Jute sont élaborés, caractérisés et l'endommagement de ce type de matériaux est analysé. Dans ce travail, nous avons étudié spécialement l'effet d'orientation des plis sur le comportement mécanique en traction statique. Quatre stratifiés à base de

polypropylène renforcé par de tissus de Jute sont élaborés avec des orientations différentes des plis ( $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $55^\circ$  et  $0^\circ$ ) en utilisant une presse à chaud. Les résultats des tests statiques en traction sont analysés, et des conclusions sont présentées.

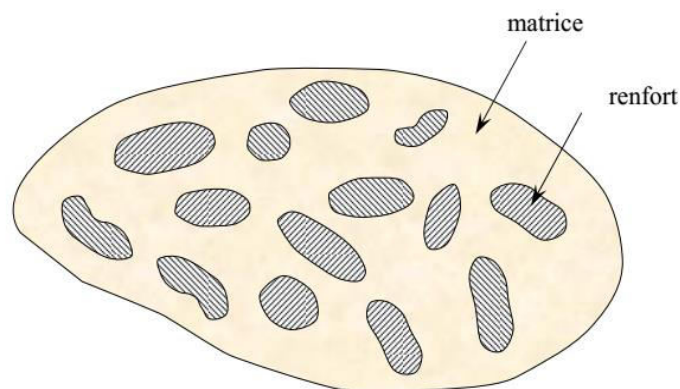
Une deuxième partie de notre travail est réservée pour une analyse numérique du comportement mécanique de ce type de stratifiés. Une approche numérique est présentée en utilisant un code de calcul ANSYS. Les résultats numériques montrent une concordance avec l'approche expérimentale.

## 1. Introduction

La technologie moderne essaie à plusieurs fois de concevoir aux matériaux de construction une bonne rigidité, une haute résistance mécanique, une ténacité élevée et une grande légèreté. Dans ce même contexte l'ingénieur désire, dans un grand nombre de situation, concevoir des structures présentant un rapport performance /masse, le plus élevé possible. Pour atteindre ces performances, il recherche toujours des matériaux ayant des caractéristiques spécifiques élevées. Les matériaux répondant à ce critère sont les composites renforcés par des fibres de verre, le carbone, le bore ...etc. Pour pouvoir réaliser des structures suffisamment tolérantes aux dommages, il est nécessaire d'utiliser des matériaux renforcés par des fibres qui sont liées entre elles par une résine .Aucun matériau classique ne permet de combiner ces caractéristiques d'où la nécessité de l'utilisation des matériaux composites, ou les matériaux stratifiés [3].

## 2. Définition d'un matériau composite

Au sens large, le mot « *composite* » signifie littéralement « un matériau qui est constitué de deux ou plusieurs matériaux non miscibles ». Les matériaux composites se constituent d'une ou plusieurs phases discontinues réparties dans une phase continue, appelée *matrice*. La phase discontinue est appelée le *renfort* ou *matériau renforçant* [4]. Le renfort apporte au matériau composite ses performances mécaniques, alors que la matrice a pour rôle de transmettre aux fibres les sollicitations mécaniques extérieures et de protéger les fibres vis-à-vis des agressions extérieures.



**Fig.I.1.** Représentation d'un matériau composite [4].

Le matériau composite (ou composite) est présenté ici dans un sens plus restrictif. C'est-à-dire que sa matrice est une résine (polyester, époxyde, etc.) et son renfort est constitué de fibres synthétiques ou végétales (verre, carbone, lin, etc.) [4].

## 2.1. Matrices

La matrice lie les fibres renforts, répartit les efforts (résistance à la compression ou à la flexion), assure la protection chimique. Par définition, c'est un polymère ou une résine organique [5].

### 2.1.1. Type de la matrice organique

Les résines utilisées dans les matériaux composites ont pour rôle **de transférer les sollicitations mécaniques aux fibres et de les protéger de l'environnement extérieur**.

Les résines doivent donc être assez déformables et présenter une bonne compatibilité avec les fibres. En outre, elles doivent avoir une masse volumique faible de manière à conserver aux matériaux composites des caractéristiques mécaniques spécifiques élevées [6].

#### ➤ Matrices thermodurcissables

Les principales résines thermodurcissables utilisées dans la mise en œuvre des matériaux composites sont par ordre décroissant en tonnage [6]:

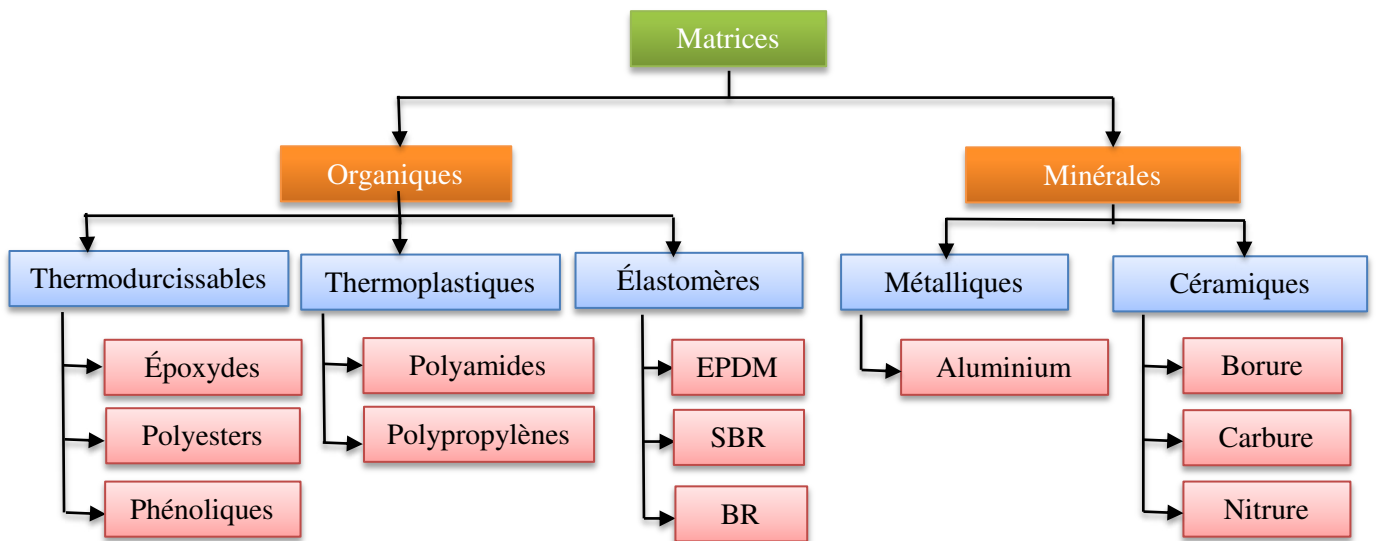
- les résines polyesters insaturées : polyesters condensés, vinylesters, dérivés allyliques.
- les résines de condensation : phénoliques, aminoplastes, furaniques, etc.,
- les résines époxydes.

#### ➤ Thermoplastiques

La famille des résines thermoplastiques (on parle de “plastiques”) est très vaste, et peut être séparée en plastiques de grande diffusion et plastiques techniques (ou techno-polymères).

Les plastiques de grande diffusion sont mis en œuvre soit par injection pour obtenir des objets moulés, soit par extrusion pour obtenir des films, des plaques, des tubes, des profilés, etc. Les plastiques techniques sont généralement mis en œuvre par injection [6].

Les principaux matériaux utilisés comme matrice sont présentés par **la Figure I.2**.



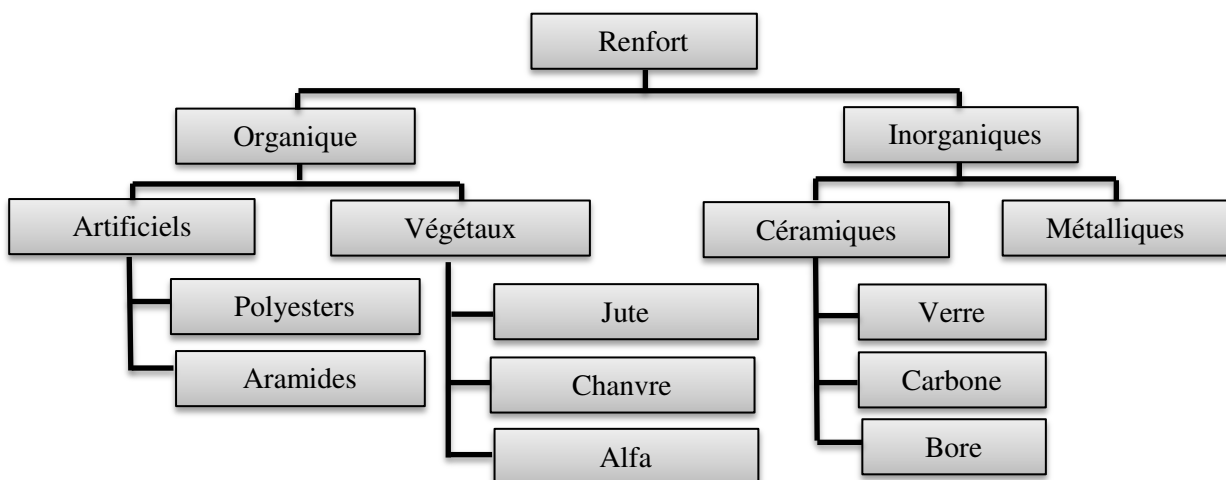
**Fig.I.2.** Types de matrices utilisées dans les matériaux composites [5]

*EPDM* : Un Terpolymère éthylène-propylène-diène, *SBR* : Un copolymère styrène-butadiène,

*BR* : Un polybutadiène.

## 2.2. Renforts

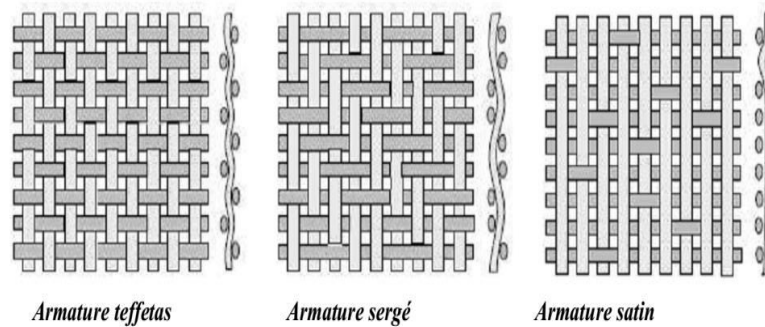
Les renforts assurent les propriétés mécaniques du matériau composite et un grand nombre de fibres sont disponibles sur le marché en fonction des coûts de revient recherchés pour la structure réalisée. Les renforts constitués de fibres se présentent sous les formes suivantes : linéique (fils, mèches), tissus surfaciques (tissus, mats), multidirectionnelle (tresse, tissus complexes, tissage tri directionnel ou plus). La classification des types de renforts couramment rencontrés est indiquée sur **la Figure I.3** [7]:



**Fig.I.3.** Architecture des renforts [7].

### Cas des Renforts tissés

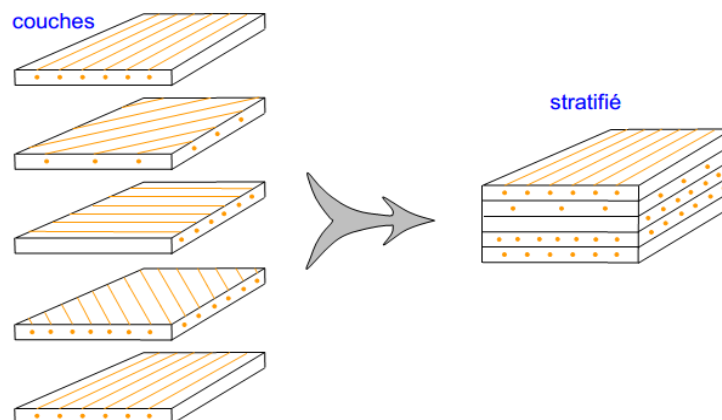
Les tissus sont réalisés sur des métiers à tisser. Ils sont obtenus par entrecroisement des mèches selon deux directions perpendiculaires, chaîne et trame. Ils peuvent avoir différentes armures ; on distingue: la toile ou le taffetas, le sergé nm et le satin (**Fig. I.4**) [8]:



**Fig.I.4.** Différentes formes de renforts tissés [8].

### 3. Matériau composite stratifié

Les matériaux stratifiés est constitué d'un empilement de monocouches ayant chacune une orientation propre par rapport à un référentiel commun aux couches (**Fig. I.5**), et désigné comme le repère des axes de symétrie du matériau .Selon la disposition des couches par rapport au plan moyen, on distingue les stratifiés symétriques et antisymétriques [3], (appelées Parfois plis) de renforts (fils, stratifiés, mats, tissus, etc.) imprégnés de résines (**Fig. I.5**). Nous examinons les divers types de stratifiés [7]. On distingue différents types de stratifiés. Les monolithiques sont constitués uniquement de plis composite fibres/résine, les sandwichs sont constitués de deux couches monolithiques appelées peaux, séparées par une âme en mousse ou en nid d'abeille.



**Fig.I.5.** Constitution d'un stratifié [9].

Un stratifié monolithique est constitué de plusieurs plis dont la direction est décalée dans chaque couche.

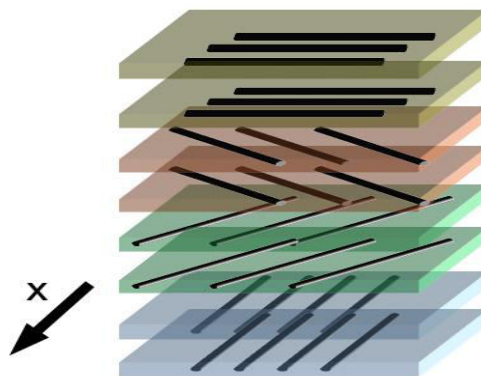
- Lorsque les fibres sont toutes dans la même direction, le pli est dit unidirectionnel;
- lorsque les fibres se présentent sous forme de tissu, le pli est dit tissé, il comporte des fibres dans deux directions appelées sens chaîne et sens trame.
- S'il y a autant de fibres dans les sens chaîne et trame le pli est dit tissé équilibré.

Sur la **Figure I.5** une présentation d'un stratifié est donnée [9].

### 3.1. L'orientation et symétrie de stratifié

Les stratifiés sont désignés par l'orientation des fibres de chaque pli par rapport à une référence arbitraire (axe  $\rightarrow x$ ) correspondant très souvent à la direction du chargement. Un pli à  $0^\circ$  possèdera des fibres orientées selon l'axe  $\rightarrow x$  tandis qu'un pli à  $90^\circ$  aura des fibres perpendiculaires à cet axe. On indique en indice le nombre de plis adjacents ayant la même orientation (on parle alors de couche). L'indice "s" correspond à un stratifié symétrique pour lequel on ne renseigne que la moitié de l'empilement. Afin de limiter le couplage traction/flexion qui complexifie l'analyse, la plupart des stratifiés sont symétriques. En plus de cette caractéristique, les stratifiés sont équilibrés pour obtenir un comportement orthotrope macroscopiquement. Ainsi, pour chaque orientation  $\theta$ , le stratifié doit contenir une couche dont la direction des fibres fait un angle  $-\theta$  avec l'axe  $\rightarrow x$ . Les stratifiés  $[0/90]_s$  sont par construction équilibrés. Enfin, l'ordre des couches a un impact sur les effets de bord principalement, le comportement macroscopique à cœur étant le même quel que soit l'agencement du stratifié. A titre d'exemple, l'empilement  $[0/-45/45/90]_s$  donne un comportement identique au stratifié  $[0/90/45/-45]_s$  [10].

L'exemple de la **Figure I.6** montre la moitié d'un stratifié  $[0_2/\pm 45_2/90_2]_s$  contenant 2 plis élémentaires à  $0^\circ$ , 2 à  $45^\circ$ , 2 à  $-45^\circ$  et 2 à  $90^\circ$ , symétrique par rapport au plan supérieur du pli à  $90^\circ$

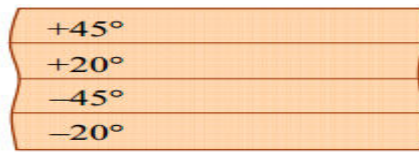


**Fig.I.6.** Moitié d'un empilement  $[0_2/\pm 45_2/90_2]_s$  [10].

### 3.2. Type de stratifié :

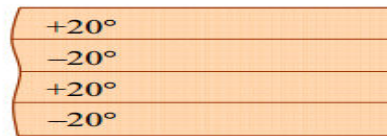
Le choix de l'empilement et plus particulièrement des orientations permettra d'avoir des propriétés mécaniques spécifiques. On pourra avoir des stratifiés du type :

- ✓ **Équilibré** : stratifié comportant autant de couches orientées suivant la direction  $+\theta$  que de couches orientées suivant de la direction  $-\theta$ .



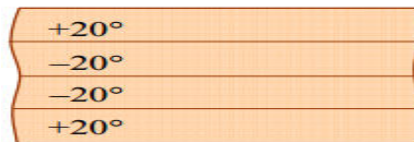
**Fig.I.7.** stratifié équilibré [11].

- ✓ **Symétrique** : stratifié comportant des couches symétrique par rapport à un plan moyen.



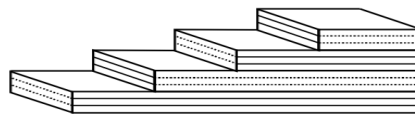
**Fig.I.8.** stratifié symétrique [11].

- ✓ **Antisymétrique** : stratifié comportant des couches non symétriquement par rapport à un plan moyen.



**Fig.I.9.** stratifié antisymétrique [11].

- ✓ **Croisé** : stratifié comportant autant de couches à  $0^\circ$  que de couches à  $90^\circ$ .



**Fig.I.10.** stratifié Croisé  $[0_2/90_2]_s$  [12].

- ✓ **Hybride** : les couches successives comportent des fibres de natures différentes, il s'agit d'un stratifié hybride.

$0^\circ$	V
$45^\circ$	C
$-45^\circ$	C
$90^\circ$	C
$90^\circ$	C
$-45^\circ$	C
$45^\circ$	C
$0^\circ$	V

$[0_V / \pm 45_C / 90_C]_S$

**Fig.I.11.** stratifié Hybride (V : verre, C : carbone) [13].

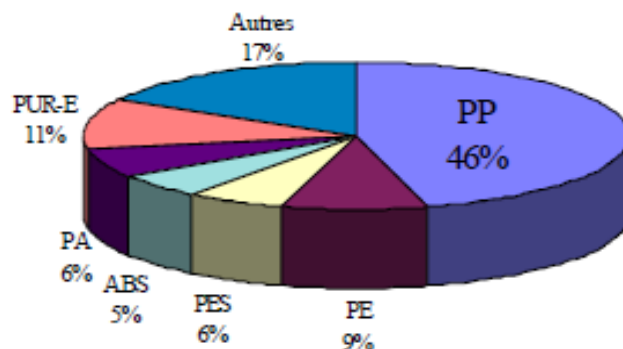
## 1. Introduction

Durant ces dernières années, les composites à base des thermoplastiques ont trouvé un ressort considérable. Les matrices thermoplastiques les plus utilisées dans les composites à fibres naturelles sont le polypropylène et le polyéthylène [14,15],

Les matrices thermoplastiques (polypropylène, par exemple) renforcées par des fibres végétales ont été développées pour être utilisées dans différents domaines (automobile, électroménager, mobilier urbain, outillage...). Les fibres végétales possèdent donc un fort potentiel de développement comme renfort pour les matrices polymères. En effet, la disponibilité, la recyclabilité et le faible cout encouragent le développement de nouvelles applications dans ces composites [16].

## 2. Les matrices thermoplastiques

L'utilisation des polymères ne cesse de croître notamment dans les équipements automobiles ; Les polymères utilisés sont essentiellement des thermoplastiques techniques qui présentent à l'état vierge de bonnes caractéristiques mécaniques comme illustré sur la **Figure II.1** [17].



**Fig. II.1.** Répartition des polymères utilisés dans les véhicules : les thermoplastiques PP, PE, PES, PA sont les plus utilisés d'après [18]

Le renforcement des thermoplastiques à l'aide de fibres leur confère une tenue thermique et mécanique améliorée et une bonne stabilité dimensionnelle [17]. Les principales familles de thermoplastiques sont [19] :

- Polypropylène (PP)
- acide poly lactique(PLA)
- polyéthylène à haute densité(HDPE)
- polychlorure de vinyle amorphe(PVC)

- polystyrène (PS)
- polyéthylène téréphtalate semi cristallin (PET)
- acrylonitrile butadiène styrène (ABS)

Les polyoléfines (les polyéthylènes, les polypropylènes), les plastiques à base de polychlorure de vinyle, les acryliques et les polystyrènes.

**Le tableau II.1.** Regroupe certaines des propriétés physico mécaniques des résines les plus utilisées.

Polymère	T <sub>g</sub> (°C)	T <sub>f</sub> (°C)	Densité $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\sigma_r$ (MPa)	E (GPa)
PP	5	165	0,92	30	1,2
PLA	50-60	150	1,25	40-60	3-4
HDPE	-100	134	0,95	28	1,1
PVC	75-105	160-220	1,39	58	2,9
PS	90-100	-	1,05	55	3,2
PET	70	255-265	1,30	47	2,6
ABS	90-120	-	1,05	50	2,5

*T<sub>g</sub>* : température de transition vitreuse, *T<sub>f</sub>*: température de fusion

**Tab II.1.**Caractéristiques des thermoplastiques [19].

## 2.1. Propriétés mécaniques des matrices thermoplastiques

Les résines polypropylène présentent de bonnes propriétés mécaniques notamment en termes de rigidité (module d'Young) et de ductilité. En revanche, leur contrainte à la rupture reste inférieure aux autres résines (Tableau II.2). Au niveau macroscopique, leurs comportement est considéré isotrope et dépend de la température. Il passe de l'état vitreux à l'état caoutchouteux avec une augmentation de température, ce passage s'effectue lorsque la température atteint la température de transition vitreuse T<sub>g</sub>. Les propriétés mécaniques évoluent en fonction de la vitesse de sollicitation (comportement visqueux). Cependant, à température ambiante, le comportement mécanique des résines est modélisable par une loi élasto-plastique [16]. Les propriétés mécaniques de quelques matrices thermoplastiques sont données dans (le tab II.2).

Matériau	T° <sub>max</sub> , utilisation continue (°C)	$\sigma_{rup}$ (MPa)	E(MPa)	Densité (g/cm <sup>3</sup> )	prix (indis)
PA6	-	70	2,1	1,09	-
PA8	90	80	2,6	1,13	10
PA11	100	60	1	1,05	-
PA12	100	-	1	1,02	-
PAI	200	190	4,5	1,45	200
PBI	425	160	5,9	1,3	-
PC	130	75	2,4	1,2	25
PCTFE	155	45	1,4	2,15	120
PEBD	50	-	0,2	0,91	6
PEEK	240	120	3,6	1,3	240
PEHD	90	40	1,4	0,95	11
PEI	170	105	3	1,27	99
PES	180	97	2,4	1,37	45
PETP	110	80	2,8	1,31	15
PI	260	86	3,25	1,43	50
PMMA	85	75	3,3	1,2	20
POM	100	73	2,8	1,41	16
PP	100	45	1	0,91	12
PPO	115	-	2,5	1,06	-
PPS	240	150	2,2	1,34	180
PS	85	60	1,6	1,05	13
PSU	180	80	2,5	1,24	42
PTFE	200	40	0,3	2,2	63
PUR	90	40	3	1,25	44
PVC	60	58	2,8	1,35	6
PVDF	150	60	1	1,76	65

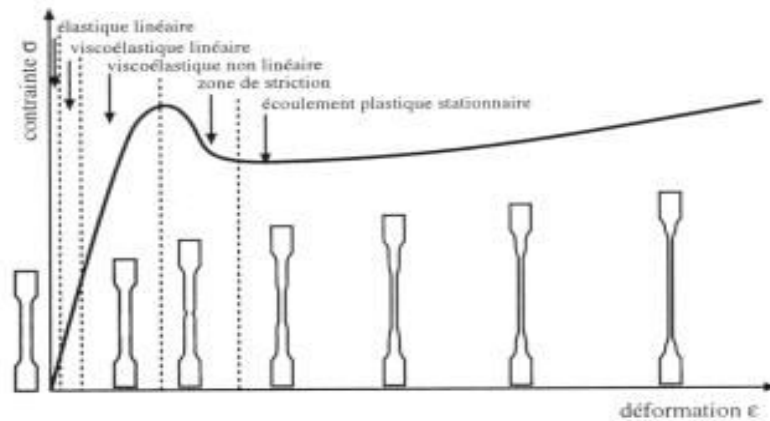
Tab 11.2. Différents thermoplastiques [24]

## 2.2. Mécanismes de déformation des polymères

Les polymères sont caractérisés par un comportement ductile, montrée par une augmentation de la température ou une diminution de la vitesse de chargement. La grande ductilité est associée à une réorientation des chaînes des polymères amorphes ou semi-cristallins. Cependant, pour différents types de polymères, l'essai de traction permet d'observer la déformation macroscopique et les mécanismes de déformation induits [16].

Les paramètres qui permettent de quantifiés la réponse d'un polymère : sa rigidité (E), sa résistance à la rupture ( $\sigma_f$ ) et sa ductilité ( $\epsilon_{ultime}$ ).

La courbe caractéristique en traction d'un polymère thermoplastique semi-cristallin peut être divisée en plusieurs parties (Figure 1-7). Pour de faibles déformations, les thermoplastiques révèlent un comportement à la fois élastique (à basse température et à vitesse de sollicitation élevée) et visqueux (dans les conditions inverses) [21]. Si les deux aspects sont présents, on parle alors de la déformation viscoélasticité, dans ce cas le phénomène est réversible. Puis la réponse devient non-linéaire, avant d'atteindre le seuil d'écoulement (début de striction).



**Fig. II.2.** Réponse caractéristique en traction d'un polymère thermoplastique semi-cristallin et évolution de la forme de l'éprouvette [22]

### 3. Fibres végétales

#### 3.1. Définition d'une fibre végétale

Les fibres végétales sont des structures biologiques fibrillaires composées de cellulose, hémicelluloses et de lignine. En proportion relativement faible d'extractibles non azoté, de matière protéique brute, de lipide et de matières minérales. Les proportions de ces constituants dépendent énormément de l'espèce, de l'âge et des organes de la plante [23].

#### 3.2. Classification des fibres végétales

Il existe plusieurs critères de différenciation des fibres :

- ✓ suivant l'organe de la plante dont elles sont issues, les fibres végétales peuvent être classées en fibres de tiges ( Kéna f , jute, lin, ramie), et de feuilles (Sisal, abaca , paille de graminée) [24].
- ✓ Suivant leur teneur en cellulose, hémicellulose et en lignine, on peut distinguer les fibres ligneuses (dures et rigide provenant de matériels ligneux tels que le

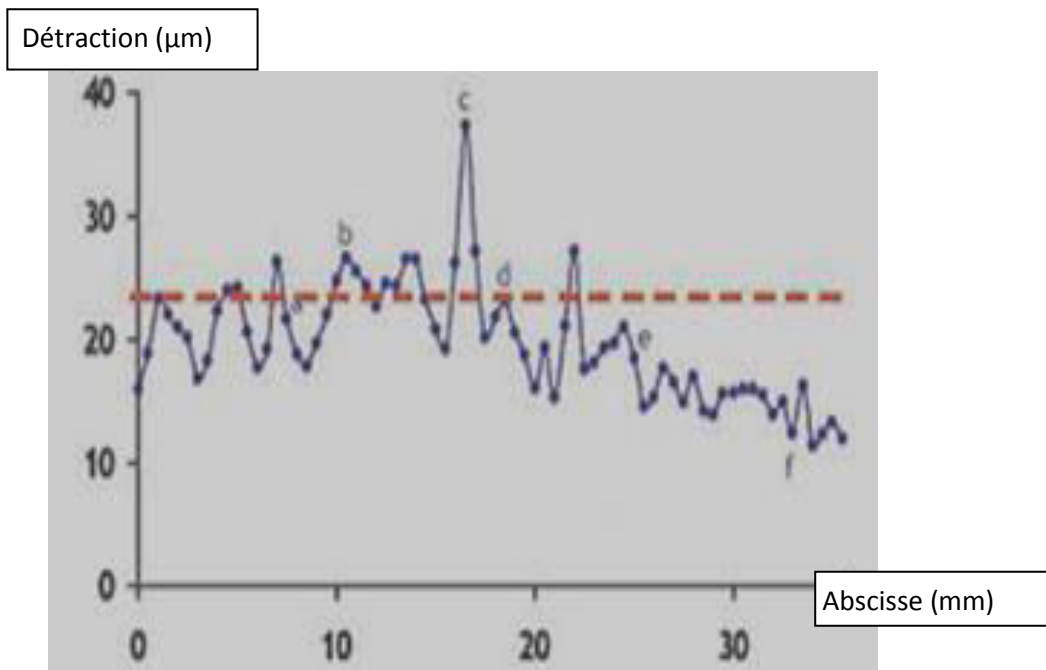
bois d'œuvre, les résidus de l'industrie du bois et les fibres non ligneuses (douces, souples, issues de végétaux non ligneux souvent annuels relativement moins riches en lignine tels que le kénaf, le chanvre, le sisal, le jute et le lin) [10].

- ✓ Suivant leur longueur, les fibres végétales peuvent être groupées en deux catégories : fibres longues, dites libérienne, provenant des tiges et d'écorce de tiges de plantes annuelles. Elles sont douces, tandis que les fibres longues issues de feuilles ou de troncs d'arbre sont plus dures et plus rigides à cause de leur richesse en lignine, et fibres courtes ou étoupes qui sont associées aux fibres longues [24].

### 3.3. Morphologie de la fibre végétale

Sur le plan morphologique, la fibre végétale présente une variabilité très importante en fonction de son origine. En effet, les dimensions des fibres végétales dépendent de l'état de maturité et aussi des conditions environnementales de croissance de la plante. La variabilité du diamètre peut être très importante le long de la même fibre végétale (**Fig II.3**) [25].

La fibre végétale se caractérise aussi par la variabilité de l'épaisseur de sa paroi cellulaire qui découle de celle de La porosité des fibrilles [26].



**Fig. II.3.** Variation du diamètre le long de fibre de lin [25]

Fibre	Longueur de la fibre (mm)	Diamètre de La fibre ( $\mu\text{m}$ )	Angle micro fibrillaire ( $^{\circ}$ )
Cotton	35	10 – 45	-
Lin	4 – 77	5 – 76	10
Chanvre	5 – 55	10 – 51	6,2
Kénaf	2,5 - 4,5	14 – 33	-
Jute	2,5	5 – 25	8
Sisal	900	8-50	20
Rami	900 - 1200	20 - 80	7,5
Noix de coco	03-1	12-24	45

**Tab II.3.** *Propriétés morphologiques de quelques fibres végétales [27]*

La morphologie des fibres végétales peut constituer une donnée importante pour bien appréhender les transferts de contrainte aux interfaces fibre-matrice.

### 3.4. Structure et composition des fibres naturelles d'origine végétale

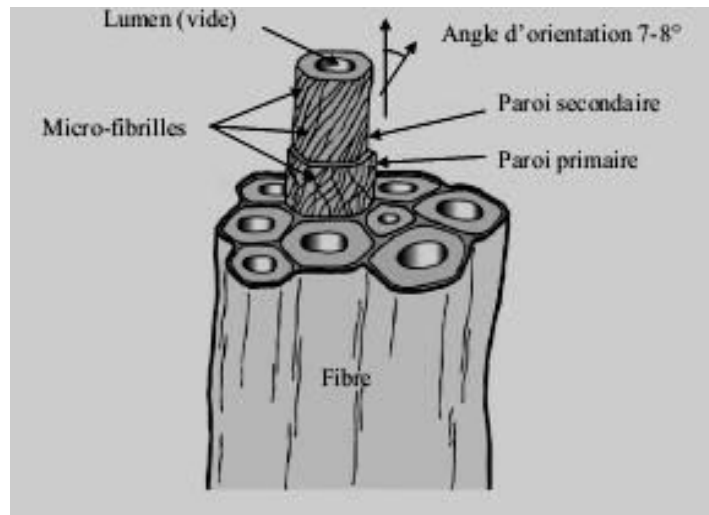
Les propriétés mécaniques des fibres naturelles sont déterminées par leur :

- Composition chimique : pourcentage de cellulose (micro-fibrille = renfort).
- Structure physique : angle micro-fibrillaire. La diminution de l'angle entraîne une augmentation de la rigidité et la résistance.

#### a) Structure de la fibre végétale

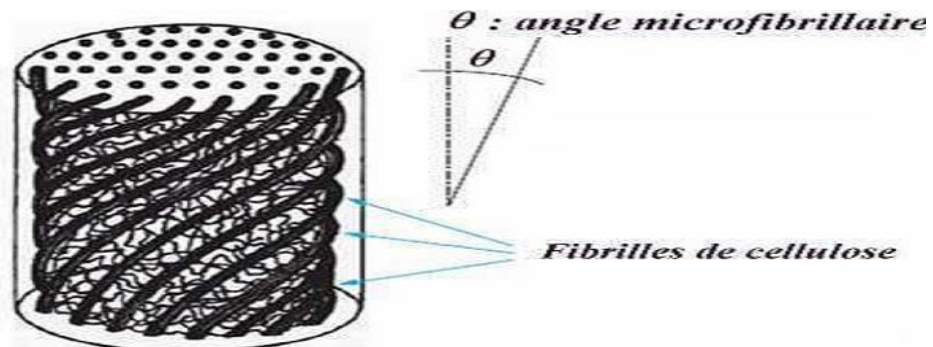
La fibre végétale est un composite en elle-même. Le renfort est constitué par les couches de microfibrille cellulosiques en partie cristalline. Ce dernier est enrobé d'une matrice polysaccharidique amorphe (hémicellulose et pectine) qui est associée par liaison hydrogène et covalentes à la lignine [17].

La fibre végétale est composée de plusieurs parois parallèles à l'axe de la fibre et disposée en couche superposée dans le sens radiale. Ces différentes couches qui forment la lamelle mitoyenne, la paroi primaire et la paroi secondaire. Ces dernières bordent un lumen de diamètre variable suivant l'espèce. La paroi secondaire est composée de trois couches de microfibrilles (S1, S2, S3) (**Fig II. 4**) [27].



**Fig. II.4.** Schéma des parois d'une fibre de jute [28].

Les micro-fibrilles décrivent par rapport à l'axe de la fibre, un angle micro-fibrillaire (MAF) dont la valeur varie d'une espèce à l'autre. L'orientation des microfibrilles par rapport à l'axe de la cellule joue un grand rôle dans les propriétés mécaniques des parois des fibres, plus que l'angle des microfibrilles augmente, le module de Young (une mesure de la rigidité) décroît, tandis que l'extensibilité des parois augmente [29].



**Fig. II.5.** Modèle de description de la structure d'une fibre végétale [28].

### b) Composition chimique des fibres végétales

La biomasse végétale est constituée de plusieurs macromolécules étroitement liées entre elles au sein de la paroi végétale. Comme nous l'avons vu précédemment les composés les plus majoritaires sont la cellulose, l'hémicellulose, les pectines et les lignines. Ces différents constituants sont agencés de manière très complexe **Fig. II.6.**

- Cellulose

La cellulose est le constituant principal de la masse végétale. Ce polymère linéaire de glucose présente est à l'état presque pur (>90%) dans la fibre de coton. Il est aussi, avec de la lignine, l'un des constituants essentiels du bois (50%) [30].

- Hémicelluloses

On désigne par hémicellulose tout polysaccharide soluble dans l'eau et pouvant être extrait de la paroi des cellules végétales par des solutions acides. Les hémicelluloses sont une classe de polymères très variés (de nombreux monomères et de nombreux branchements différents). Elles sont donc assez mal définies. Dans leurs états naturels, leur structure est fonction de l'espèce végétale. Elles ont un degré de polymérisation compris entre 200 et 300 [30].

- Pectines

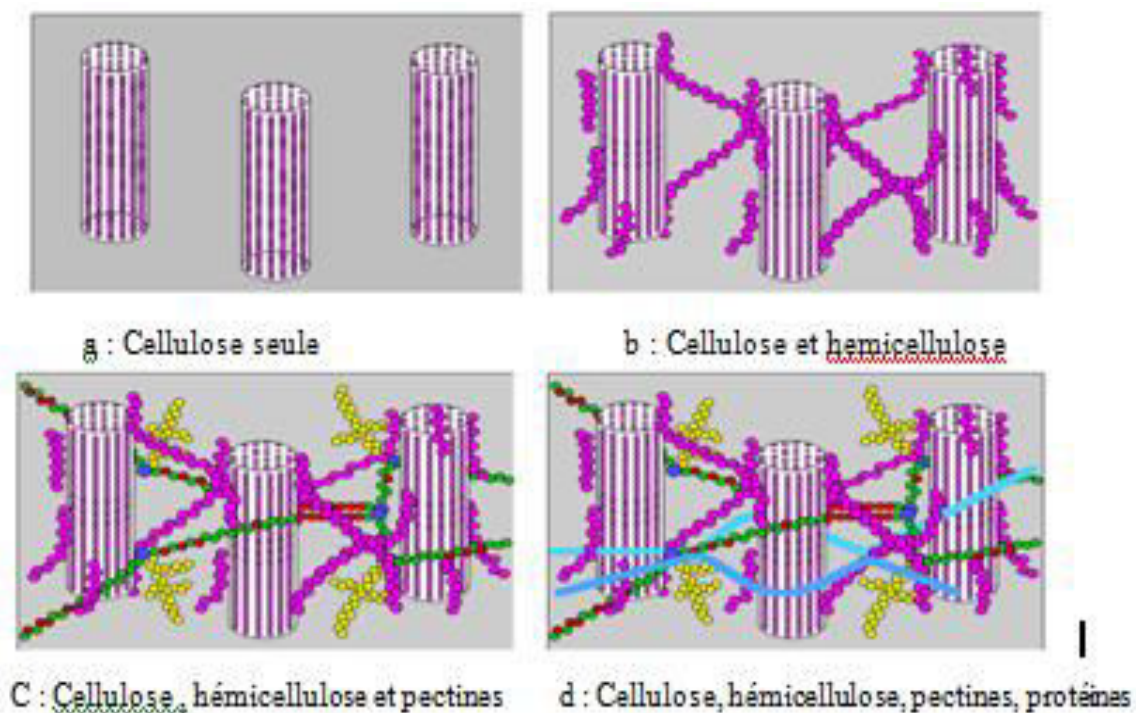
Les pectines jouent un rôle capital dans l'architecture de la paroi végétale. Ces substances pectiques sont présentes avec des proportions variées dans la plupart des végétaux (environ 1% dans le bois). Elles jouent le rôle de ciment intercellulaire et contribuent à la cohésion des tissus végétaux [30].

- Lignine

La lignine est après la cellulose, la matière organique renouvelable et la plus abondante à la surface terrestre. La lignine originelle ou "protolignine" constitue la plus importante fraction non saccharique des fibres végétales. C'est la matière "Incrustante" de la cellulose. La lignine est constituée de polymères phénoliques tridimensionnels, amorphes possédant trois unités différentes de type pénylopropane : les alcools p-coumarylique, coniférylique et sinapylique[31].

- Extractibles

Ce sont des molécules de faible masse molaire qui remplissent la lumière des cellules. Ils représentent 2 à 5 % de la masse sèche. La plupart de ces extractibles sont solubles dans l'eau ou des solvants organiques, d'où leur dénomination. La composition en extractibles varie en fonction de l'essence considérée et influe sur la couleur et l'odeur. Il s'agit de tanins, de pectines, de sucre et d'autres composés [32]



**Fig. II.6.** Exemple de représentation schématique de l'agencement des différents composants des fibres de chanvre à l'échelle micrométrique [33]

	Cellulose	Hémicellulose	Lignines	Pectines	Autres (cire, eau...)
Lin	64 – 85	5 – 20	0 – 5	2 – 20	9 - 12
Chanvre	58-85	10 – 23	3 – 6	1 – 17	11
Jute	61 – 75	11 - 15	8 – 15	0,2 – 1	11
Rmie	68,6 – 76,2	13 – 17	0,6	1,9 – 2	8,3
Sisal	66	12	9,9	0,8	11,3

**Tab .II.4.** Composition chimique de quelques plantes à fibres [34].

### 3.5. Propriétés Mécaniques des Fibres Végétales

Elle est caractérisée mécaniquement par sa résistance à la traction, son élongation à la rupture et son module d'élasticité [16]. Le **Tableau II.5** présente les propriétés usuelles des fibres végétales.

Fibre	Densité (g/cm <sup>3</sup> )	Allongement(%)	Résistance à la traction (MPa)	Module Young (GPa)
<b>Coto</b>	1,5-1,6	7 – 8	287 – 597	5,5 – 12,6
<b>Jute</b>	1,3	1,5 – 1,8	393 – 773	26,5
<b>Lin</b>	1,5	2,7 – 3,2	345 – 1035	27,6
<b>Chanvre</b>	-	1,6	690	61,4 – 128
<b>Ramie</b>	-	3,6 – 3,8	400 – 938	61,4 – 128
<b>Sisal</b>	1,5	2 – 2,5	511 – 635	6,4 – 22
<b>Coco</b>	1,2	30	175	4 – 6
<b>Verre E</b>	2,5	2,5	2000 – 3500	70
<b>Verre S</b>	2,5	2,8	4570	86
<b>Aramide</b>	1,4	3,3 – 3,7	3000 – 3150	63 – 67
<b>Carbone</b>	1,4	1,4 – 1,8	4000	230 – 240

**Tab II.5.** *Propriétés mécaniques des fibres naturelles en comparaison avec des fibres de renforcement conventionnelles [31].*

#### 4. Avantages et inconvénients des fibres végétales

Pour des raisons de disponibilité et de coût, les fibres naturelles d'origine végétale sont les plus utilisées pour le renforcement des matériaux composites ; elles constituent une alternative intéressante aux fibres de verre en raison de leur recyclabilité. Ces fibres présentent de nombreux avantages comme renfort des composites. En revanche, certains inconvénients peuvent être un frein au niveau de développement industriel.

Avantage	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Faible coût,- Biodégradable</li> <li>- Neutre pour l'émission de CO2</li> <li>- Pas de résidus après incinération</li> <li>- Ressource renouvelable</li> <li>- Propriétés mécaniques spécifiques</li> <li>- importantes (résistance et rigidité)</li> <li>- Non abrasif pour les outillages</li> <li>- Demande peu d'énergie pour la production</li> <li>- Pas d'irritation cutanée lors de la manipulation des fibres</li> <li>- Bon isolant thermique et acoustique</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Absorption d'eau</li> <li>- Biodégradable</li> <li>- Fibres anisotropes</li> <li>- Faible stabilité dimensionnelle</li> <li>- Renfort discontinu</li> <li>- Pour de l'application industrielle, croissance, des conditions météorologiques</li> <li>- Faible tenue thermique (200 à 300°C max).</li> <li>- Variation de qualité en fonction du lieu de croissance, des conditions météorologiques</li> </ul>

**Tab II.6.** *Principaux avantages et inconvénients des fibres végétales comme renforts dans les matrices polymères [16]*

# 1. Loi De Hooke Pour Un Composite Orthotrope

## 1.1. Composite orthotrope

Les stratifiés sont constitués de couches de matériaux composites unidirectionnels ou de composites à base de tissus. Généralement, les tissus sont constitués de fils unidirectionnels croisés à 90 ° : les uns dans le sens chaîne, les autres dans le sens trame. Ces couches possèdent trois plans de symétrie orthogonaux deux à deux, et se comportent d'un point de vue élastique comme un matériau orthotrope. Les directions principales (1, 2) seront prises respectivement suivant la direction chaîne et la direction trame ; ces directions seront également notées *L* et *T* Figure III.1. La direction 3 orthogonale au plan de la couche sera également notée *T'* [13].

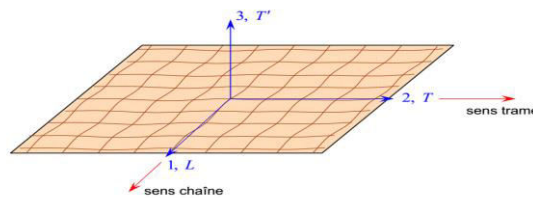


Fig.III.1. Couche de matériau composite orthotrope [13].

## 1.2. Généralités

Un matériau est une matière d'origine naturelle ou artificielle que l'homme façonne pour en faire des objets, l'expérience à montrer que les matériaux ont en général un comportement élastique linéaire [35].

Les déformations sont des fonctions linéaires et homogènes des contraintes. la relation d'élasticité peut s'écrire à partir de loi de Hooke généralisée comme :

$$\sigma = C \varepsilon \dots\dots\dots (III.1)$$

Avec C : est la matrice de rigidité du matériau

Ou sous forme matricielle :

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{14} & C_{24} & C_{34} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{15} & C_{25} & C_{35} & C_{45} & C_{55} & C_{56} \\ C_{16} & C_{26} & C_{36} & C_{46} & C_{56} & C_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{Bmatrix} \dots\dots\dots (III.2)$$

La matrice inverse de la matrice [C] nous permet d'obtenir la matrice de souplesse [S].

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} & S_{15} & S_{16} \\ S_{12} & S_{22} & S_{23} & S_{24} & S_{25} & S_{26} \\ S_{13} & S_{23} & S_{33} & S_{34} & S_{35} & S_{36} \\ S_{14} & S_{24} & S_{34} & S_{44} & S_{45} & S_{46} \\ S_{15} & S_{25} & S_{35} & S_{45} & S_{55} & S_{56} \\ S_{16} & S_{26} & S_{36} & S_{46} & S_{56} & S_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{Bmatrix} \dots\dots\dots(\text{III.3})$$

**1.3. Matrice de rigidité et de souplesse**

Le comportement élastique d'un matériau composite orthotrope est décrit en introduisant soit les constantes de rigidité  $C_{ij}$ , soit les constantes de souplesse  $S_{ij}$  ( $i \neq j$ ). La loi de Hooke s'écrit suivant l'une des formes matricielles [14]:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{56} & C_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{Bmatrix} \dots\dots\dots(\text{III.4})$$

Ou :

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0 \\ S_{13} & S_{23} & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{56} & S_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{Bmatrix} \dots\dots\dots(\text{III.5})$$

Le comportement élastique d'un matériau composite orthotrope est donc caractérisé par 9 coefficients indépendants :

$$C_{11}, C_{12}, C_{13}, C_{22}, C_{23}, C_{33}, C_{44}, C_{55}, C_{66}.$$

Ou:

$$S_{11}, S_{12}, S_{13}, S_{22}, S_{23}, S_{33}, S_{44}, S_{55}, S_{66}.$$

Les matrices de rigidité et de souplesse étant inverses l'une de l'autre, nous avons :

$$\begin{aligned} C_{11} &= \frac{S_{22}S_{33} - S_{23}^2}{\Delta S} & , & & C_{12} &= \frac{S_{13}S_{23} - S_{12}S_{33}}{\Delta S} \\ C_{22} &= \frac{S_{33}S_{11} - S_{13}^2}{\Delta S} & , & & C_{13} &= \frac{S_{12}S_{23} - S_{13}S_{22}}{\Delta S} \dots\dots\dots(\text{III.6}) \end{aligned}$$

$$C_{33} = \frac{S_{11}S_{22} - S_{12}^2}{\Delta S} \quad , \quad C_{23} = \frac{S_{12}S_{13} - S_{23}S_{11}}{\Delta S}$$

$$C_{44} = \frac{1}{S_{44}} \quad , \quad C_{55} = \frac{1}{S_{55}} \quad , \quad C_{66} = \frac{1}{S_{66}}$$

Avec :  $\Delta S = S_{11}S_{22}S_{33} - S_{11}S_{23}^2 - S_{22}S_{13}^2 - S_{33}S_{12}^2 + 2S_{12}S_{23}S_{13} \dots \dots \dots (III.7)$

Les relations inverses donnant les coefficients de souplesse en fonction des coefficients de rigidité sont obtenues en intervertissant les rôles de  $C_{ij}$  et  $S_{ij}$ .

Le composite unidirectionnel est un cas particulier de matériau orthotrope dit *orthotrope de révolution*, pour lequel :

$$C_{13} = C_{12} \quad , \quad C_{44} = \frac{1}{2} (C_{22} - C_{23})$$

$$C_{33} = C_{22} \quad , \quad C_{55} = C_{66} \dots \dots \dots (III.8)$$

Et

$$S_{13} = S_{12} \quad , \quad S_{44} = 2 (S_{22} - S_{23})$$

$$S_{33} = S_{22} \quad , \quad S_{55} = S_{66} \dots \dots \dots (III.9)$$

## 2. Module de l'ingénieur

Les modules usuels de l'ingénieur (module d'Young, coefficients de Poisson, modules de cisaillement) s'expriment simplement en fonction des coefficients de souplesse.

### 2.1. Traction dans le sens chaîne

Dans un essai de traction suivant le sens chaîne, toutes les contraintes sont nulles, excepté la contrainte  $\sigma_1$  :

$$\sigma_1 \neq 0$$

$$\sigma_i = 0 \quad \text{si } i = 2, 3, \dots, 6. \dots \dots \dots (III.10)$$

En fonction des constantes de souplesse, les équations d'élasticité s'écrivent :

$$\varepsilon_1 = S_{11}\sigma_1 \quad , \quad \varepsilon_2 = S_{12}\sigma_1 \quad , \quad \varepsilon_3 = S_{13}\sigma_1$$

$$\varepsilon_4 = \varepsilon_5 = \varepsilon_6 = 0 \dots\dots\dots (III.11)$$

$$\text{Soit : } \sigma_1 = \frac{1}{S_{11}} \varepsilon_1, \quad \varepsilon_2 = \frac{S_{12}}{S_{11}} \varepsilon_1, \quad \varepsilon_3 = \frac{S_{13}}{S_{11}} \varepsilon_1 \dots\dots\dots (III.12)$$

Nous en déduisons le module d'Young et les coefficients de Poisson, mesurés dans un essai de traction suivant le sens chaîne :

$$E_{ch} = E_L = E_1 = \frac{1}{S_{11}}$$

$$\nu_{LT} = \nu_{12} = \frac{S_{12}}{S_{11}}, \quad \nu_{LT'} = \nu_{13} = \frac{S_{13}}{S_{11}} \dots\dots\dots (III.13)$$

## 2.2. Traction dans le sens trame

Dans un essai de traction suivant le sens trame, seule la contrainte  $\sigma_2$  n'est pas nulle :

$$\sigma_2 \neq 0$$

$$\sigma_i = 0 \quad \text{si } i \neq 2. \dots\dots\dots (III.14)$$

Les équations d'élasticité s'écrivent :

$$\varepsilon_1 = S_{12} \sigma_2, \quad \varepsilon_2 = S_{22} \sigma_2, \quad \varepsilon_3 = S_{23} \sigma_2$$

$$\varepsilon_4 = \varepsilon_5 = \varepsilon_6 = 0 \dots\dots\dots (III.15)$$

$$\text{Soit : } \sigma_2 = \frac{1}{S_{22}} \varepsilon_2, \quad \varepsilon_1 = \frac{S_{12}}{S_{22}} \varepsilon_2, \quad \varepsilon_3 = \frac{S_{23}}{S_{22}} \varepsilon_2 \dots\dots\dots (III.16)$$

D'où le module d'Young et les coefficients de Poisson, mesurés dans un essai de traction suivant le sens trame :

$$E_{tr} = E_T = E_2 = \frac{1}{S_{22}}$$

$$\nu_{LT} = \nu_{21} = \frac{S_{12}}{S_{22}}, \quad \nu_{TT'} = \nu_{23} = \frac{S_{23}}{S_{22}} \dots\dots\dots (III.17)$$

**Remarque :** Dans notre cas (tissu de Jute 420g/m<sup>2</sup>), le module d'Young dans la chaîne et la trame est une même valeur  $E_{tr} = E_{ch}$

### 2.3. Traction transversale

Nous appellerons traction transversale une traction effectuée dans une direction normale au plan de la couche :

$$\begin{aligned}\sigma_3 &\neq 0 \\ \sigma_i &= 0 \quad \text{si } i \neq 3. \dots\dots\dots(\text{III.18})\end{aligned}$$

Nous obtenons aisément le module d'Young transversal et les coefficients de Poisson correspondants :

$$\begin{aligned}E_{T'} &= E_3 = \frac{1}{S_{33}} \\ \nu_{T'L} &= \nu_{31} = \frac{S_{13}}{S_{33}}, \quad \nu_{T'T} = \nu_{32} = \frac{S_{23}}{S_{33}}. \dots\dots\dots(\text{III.19})\end{aligned}$$

### 2.3. Relation entre modules d'Young et coefficients de Poisson

La comparaison des diverses relations établies (III.13), (III.17) et (III.19) permet d'écrire :

$$\frac{E_L}{\nu_{LT}} = \frac{E_T}{\nu_{TL}}, \quad \frac{E_L}{\nu_{LT'}} = \frac{E_T}{\nu_{T'L}}, \quad \frac{E_T}{\nu_{TT'}} = \frac{E_{T'}}{\nu_{T'T}} \dots\dots\dots(\text{III.20})$$

Relations qui s'écrivent sous la forme condensée :

$$\frac{E_i}{\nu_{ij}} = \frac{E_j}{\nu_{ji}}, \quad i, j = 1, 2, 3 \text{ ou } L, T, T' \dots\dots\dots(\text{III.21})$$

## 3. Formulation des éléments finis

Chaque nœud de l'élément présente cinq degrés de liberté. L'approximation nodale pour les déplacements  $U_i$  d'un point quelconque d'un élément a pour expression [36] :

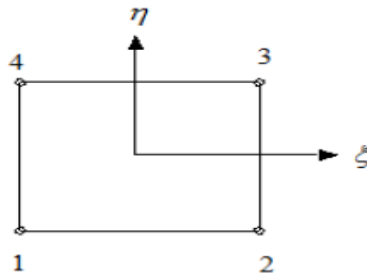
$$U_i = \sum_i^4 N_i d_i \dots\dots\dots(\text{III.22})$$

$d_i$  est le vecteur déplacement à chaque nœud qui s'écrit :

$$d_i = [u_{0i} \ v_{0i} \ w_{0i} \ \theta_{xi} \ \theta_{yi}]^T \dots\dots\dots(\text{III.23})$$

Ou

$\xi_i$  et  $\eta_i$  sont les coordonnées local telque  $\xi_i = -1, 1, 1, -1$  et  $\eta_i = -1, -1, 1, 1$  pour  $i = 1, \dots, 4$ .



**Fig.III.1.** Numérotation des nœuds de l'élément isoparamétrique à quatre nœuds [36].

L'approximation bilinéaire est déduite de la base polynomiale  $(1, \xi, \eta, \xi\eta)$  sur  $(\xi, \eta) \in [-1, 1]$ . Les fonctions d'interpolation sont :

$$N_i = \frac{1}{4}(1 + \xi_i)(1 + \eta_i) \quad i=1, 2, 3, 4 \dots\dots\dots(III.24)$$

$$N_1 = \frac{1}{4}(1 - \xi_i)(1 - \eta_i) \dots\dots\dots(III.25)$$

$$N_2 = \frac{1}{4}(1 + \xi)(1 - \eta) \dots\dots\dots(III.26)$$

$$N_3 = \frac{1}{4}(1 + \xi)(1 + \eta) \dots\dots\dots(III.27)$$

$$N_4 = \frac{1}{4}(1 - \xi)(1 + \eta) \dots\dots\dots(III.28)$$

- Matrice masse

$$[M_e] = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 [N]^T [\bar{m}] [N] |J| d\xi d\eta \dots\dots\dots(III.29)$$

- Matrice rigidité

$$[K] = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 [B]^T [D] [B] |J| d\xi d\eta \dots\dots\dots(III.30)$$

## 1. Introduction

Dans ce chapitre un type de sollicitation correspondant à un essai mécanique conventionnel qui est l'essai de traction a été retenu. Cet essai est réalisé sur 4 types de stratifiés (Polypropylène /Jute ) différemment orientés  $[0_4]_S$  ,  $[0_2,\pm 45]_S$  ,  $[0_2,\pm 55^\circ]_S$  et  $[0_2,\pm 30]_S$  . Les résultats obtenus ont permis de donner des informations sur l'évolution de propriétés mécaniques de ces stratifiés. Les lois de comportement mécanique des stratifiés ont été identifiées. Ces stratifiés ont été sollicités jusqu'à la rupture. Les lois de comportement étudiées comprennent un certain nombre de paramètres à identifier par voie expérimentale avant de pouvoir être utilisées dans la partie simulation.

## 2. Matériaux utilisés

Dans cette étude, nous avons utilisé deux composants essentiels :

- Matrice (résine thermoplastique).
- Fibre de Jute.

Le matériau stratifié considéré dans ce travail est un matériau à matrice thermoplastique chargé par des fibres naturelles.

### 2.1. Matrice

Le Polypropylène (PP) [16] : est un polymère thermoplastique de consommation courante, très utilisé dans divers applications en raison de ces propriétés remarquables, telles que : La faible densité, une bonne résistance à la flexion, à la rayure, à l'abrasion et au choc; et bonne stabilité thermique, faible densité, légèreté, chimiquement inerte, résistance haute température, écologique, rigide et durable, imperméable, 100% recyclable [30] . Cela permet au polypropylène d'être utilisé dans différents domaines, comme des pièces en plastique, les emballages des aliments et des pièces automobiles ....etc.

Les propriétés de résine polypropylène sont représentées par le (Tab IV.1). La Figure .IV.1 présente le film de plastique PP utilisé dans cette étude.

Propriétés du polypropylène		
Densité	(g/cm <sup>3</sup> )	0,905
Température de fusion	(°C)	165 - 170
Module élastique	(Gpa)	1.0 – 1.4
limite d'élasticité	(Mpa)	25 – 38
Déformation à la rupture	(%)	300
Coefficient de dilatation	(°C)	175 * 10 <sup>-6</sup>
Température de mise œuvre	(°C)	190 - 285

Tab .IV.1. Caractéristiques de résine polypropylène(PP) [30]



**Fig. IV.1.** *Film de plastique en polypropylène (PP) recyclé*

## 2.2. Fibres de Jute

Le jute est produit à partir de plantes buissonnantes originaire du sud-est asiatique (**Fig. IV.2**). Les principaux producteurs sont l'Inde, le Bangladesh et la Chine, fournissent les meilleures conditions pour la croissance de la plante du jute. Il a environ 100 espèces. La longueur moyenne des fibres est de 2 mm, avec une largeur de 20  $\mu\text{m}$ . Les caractéristiques mécaniques de cette fibre sont assimilées à celles du kenaf.



**Fig. IV.2.** *Plante et fibre de Jute*

Dans cette étude, nous avons utilisé des fibres de Jute sous forme de tissu Taffetas de masse surfacique de 420  $\text{g}/\text{m}^2$  (**Fig. IV.3**). Ce tissu nous a été fourni par la société de textile et emballage de Bejaia.



**Fig. IV.3.** *Tissu de Jute*

### 3. Préparation du stratifié

#### 3.1. Choix des éprouvettes

Pour refléter l'effet de séquences d'empilement sur le comportement mécanique en traction statique, quatre stratifiés à différentes séquences d'empilement sont élaborés. (Tab IV.2) illustre les composites stratifiés élaborés.

Orientation à	Séquences	Désignation
45°	$[0_2/\pm 45]_S$	<b>Mat-A</b>
30°	$[0_2/\pm 30]_S$	<b>Mat-B</b>
55°	$[0_2/\pm 55]_S$	<b>Mat-C</b>
0°	$[0_4]_S$	<b>Mat-D</b>

Tab IV.2. Les différents stratifiés élaborés

#### 3.2. Découpage

Le thermoplastique PP ainsi que le tissu de Jute sont découpés selon la dimension du moule (Fig. IV.8)

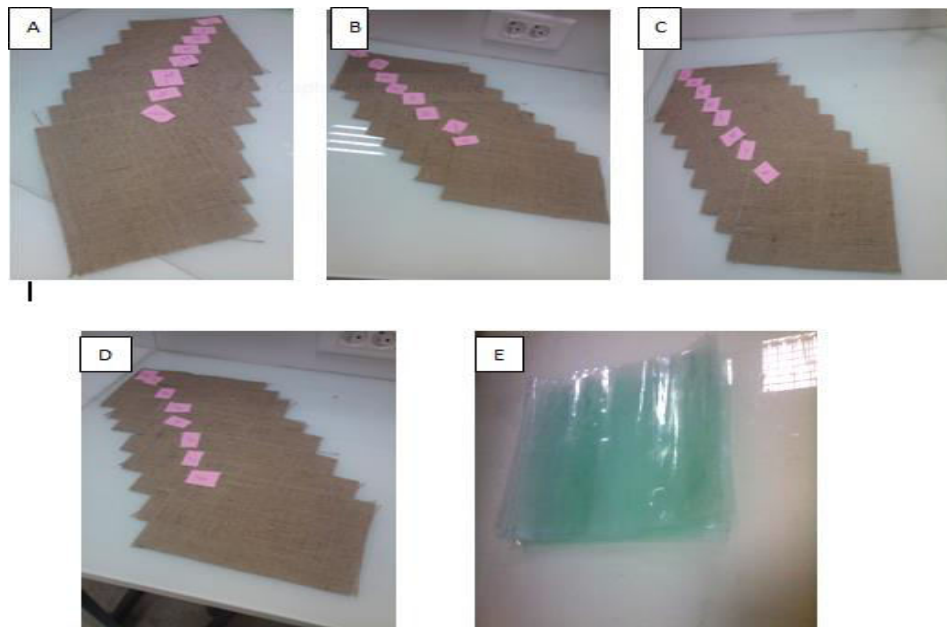


Fig. IV.4. Matériaux utilisés : orientation des plis en jute : A)  $[0_2/\pm 45]_S$ , B)  $[0_2/30]_S$ , C)  $[0_2/55]_S$   
D)  $[0_4]_S$ , E) Plastique PP

La Figure. IV.5 représente les séquences des plis PP/Jute utilisée dans chaque Plaque de stratifié. Ces séquences sont déduites après une série de tests sur les bio-composites PP/Jute.

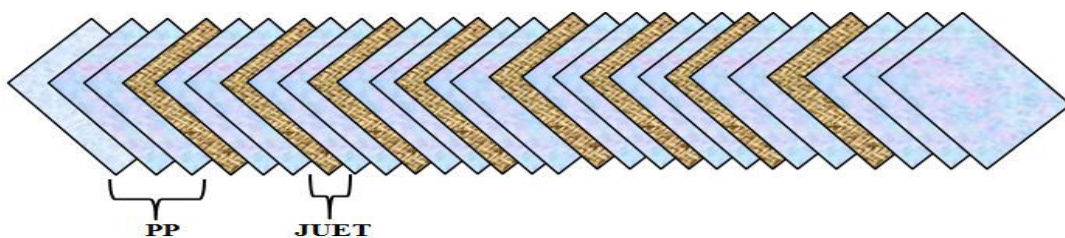


Fig. IV.5. Les séquences PP/Jute utilisés lors de l'élaboration des stratifiés

### 3.3. Compression des tissus Jute

Avant élaboration les plis de Jute sont compressés par une presse à chaud, cette technique nous permet de :

- Favoriser l'élaboration des matériaux stratifié ;
- Adaptation les plis dans le moule ;
- Réduire l'épaisseur des plis pour un stratifié idéal.

Chaque plis de Jute est compressé à 125°C durant 10mn avec une pression de 12 bars, la **Figure IV.10** illustre cette technique.



**Fig. IV.6.** Représenté la compression des tissus de Jute

### 3.4. Elaboration des stratifiés

La technique de moulage par compression a été appliquée pour la fabrication des stratifiés PP/Jute. Nous avons utilisé une presse à chaud disponible au sein de laboratoire de moulage à l'université de M'sila. Les Séquences de plis de PP et de Jute ont été insérées dans un moule adapté pour ce moulage. Les conditions d'élaboration sont comme indiqué sur (**Tab IV.3**).

Température de démarrage (° C )	Pression (bar)	Temps De maintien (mn)	Arrête (° C)
140	8	1h :30	200
160	16	1h :30	199
180	40	1h :30	201
200	40	1h :30	200

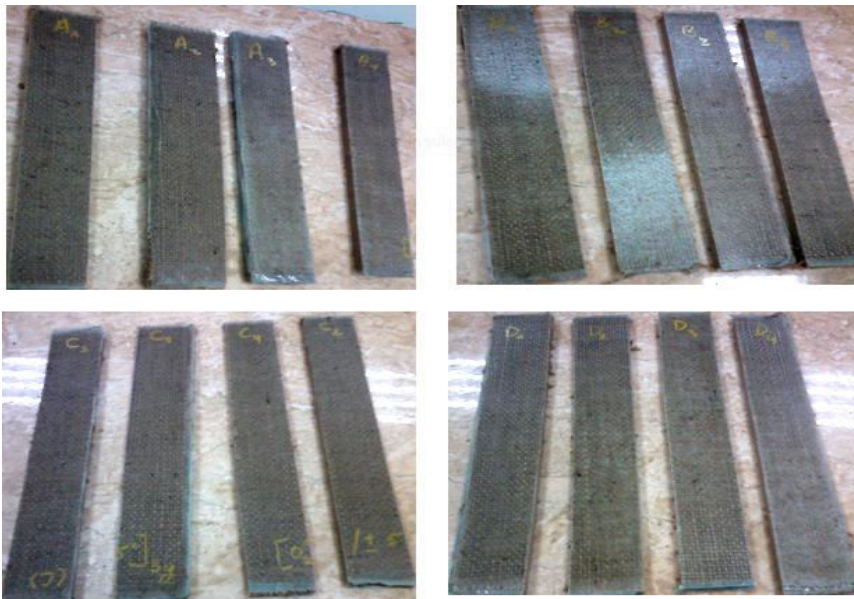
**Tab IV.3.** Les conditions d'élaboration

Les plaques stratifiées obtenues, ont été laissées à la température ambiante pour se refroidir.



**Fig. IV.7.** Les plaques des défieront stratifiées.

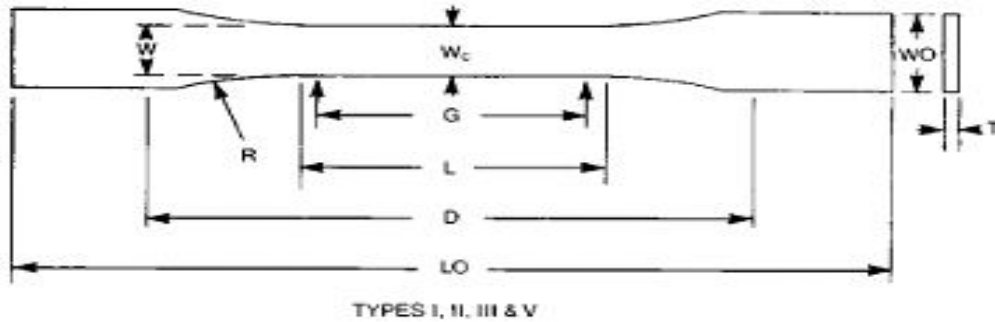
Les éprouvettes ont été découpées à l'aide d'une scie à diamant à partir de la plaque moulée après refroidissement de celle-ci. Chaque stratifié est composé de 01 plis et l'épaisseur de chaque pli est d'environ 8 mm.



**Fig. IV.8.** Un pré-échantillonnage des éprouvettes.

### 3.4. Obtention des éprouvettes

Les tests sur bio-composites sont exercés sur des éprouvettes de traction selon ASTM D638-03(Fig. IV.9).



**Fig. IV.9.** Éprouvette de traction

Selon notre cas, le type (I), est utilisé :

W = 13 mm

G = 50 mm

L = 57 mm

D = 115mm

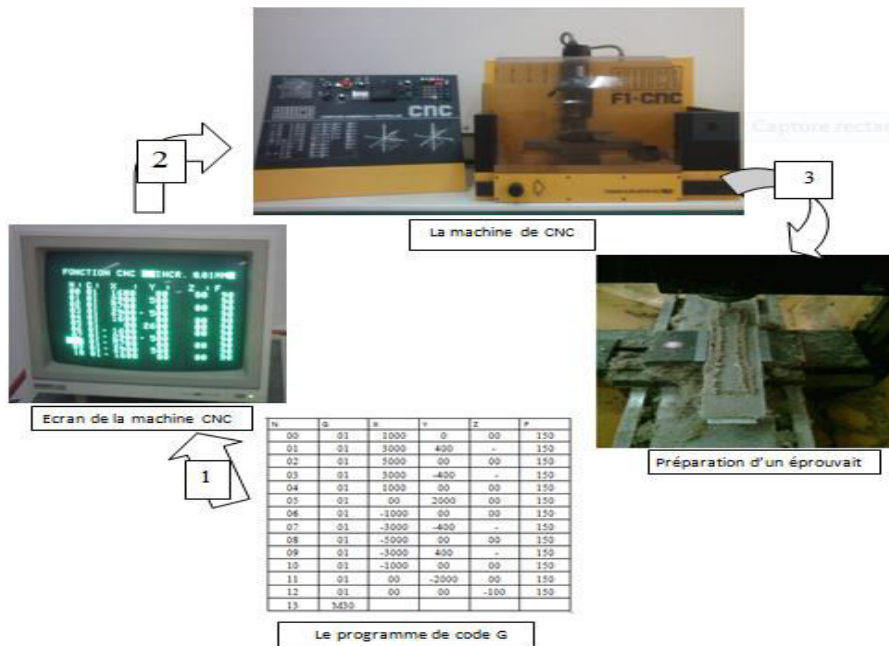
W0 = 200 mm

R = 7,5 mm

LO = 165mm

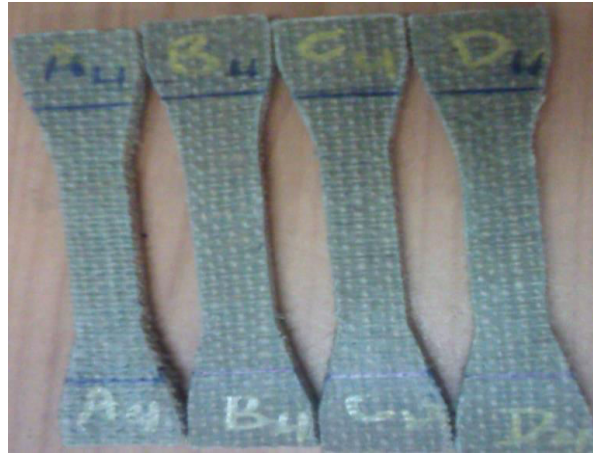
Les éprouvette sont obtenu par usinage en utilisant un machine à commande numérique (**Fig.IV.10**), cette technique nous a performant d'avoir :

- des éprouvettes identiques ;
- gain de temps ;
- absence de contraintes résiduelles.



**Fig. IV.10.** Les étapes d'usinage d'éprouvette par CNC

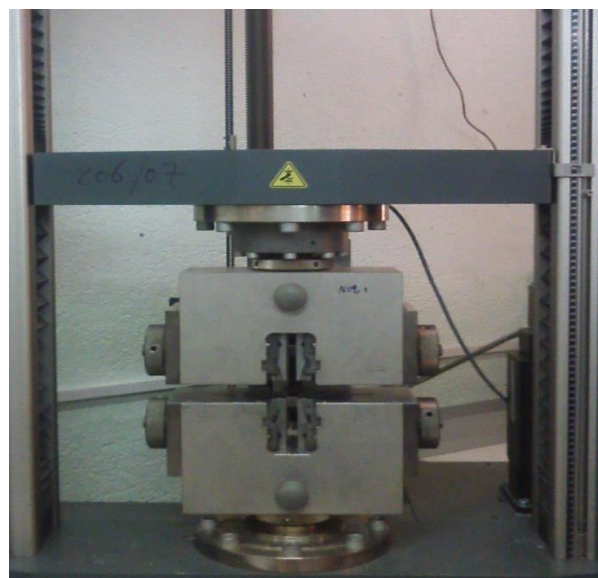
Les éprouvettes obtenues sont présentées par (Fig. IV.10).



**Fig. IV.11.** *Les éprouvettes testent*

#### **4. Essais de traction**

Le besoin de connaître les caractéristiques mécaniques des stratifiés (jute/pp) pour l'étude numérique a conduit à la réalisation de nombreux essais expérimentaux. L'essai de traction est l'essai le plus utilisé pour la caractérisation du comportement des composites en raison de sa facilité de traitement et d'analyse des résultats. Pratiquement, cet essai permet de déterminer le module élastique, la limite élastique, la résistance maximale en traction et le coefficient de Poisson. En outre, il permet d'établir des lois de comportement fiables et présente une bonne reproductivité des essais. La modélisation et la validation de ces essais seront abordées dans les sections ci-dessous



**Fig. IV.12.** *machine de test zwick /roell en traction.*

Dans cette étude, tous les essais de traction ont été effectués sur une machine ZWIK/ROELL de capacité 200KN. Les tests ont été avec une vitesse de déformation de 02 mm /min pour tous les essais.

#### 4.1. Essais de traction sur stratifié

Les essais de traction sont des expériences mécaniques exécutées dans le but de déterminer l'allongement, la contrainte à la rupture et le module d'Young des bio-composites. Pour protéger l'extensomètre de tout dommage, il a été retiré avant l'apparition de la rupture dans les éprouvettes. 4 éprouvettes ont été testées jusqu'à la rupture (**Fig. IV.13**). La force et le déplacement résultants ont été enregistrés au cours de la durée de l'essai.



**Fig. IV.13.** *L'essai de traction sur éprouvette*

Ces courbes force-déplacement fournies par la machine de traction sont transformées en courbe contrainte-déformation. A partir de ces données de mesure, la résistance et la déformation ont été calculées comme suit :

$$\sigma = F/S_0 \dots\dots\dots(IV.1)$$

$$\varepsilon = \frac{L-L_0}{L_0} \dots\dots\dots( IV.2)$$

Où :

$\sigma$  : Contrainte de rupture (MPa).  $\epsilon$  : La déformation de la longueur des éprouvettes.

F : charge appliquée(N).

$S_0$  : la surface transverse initiale ( $\text{mm}^2$ ).

$L_0$  : la longueur initiale de l'éprouvette (mm).

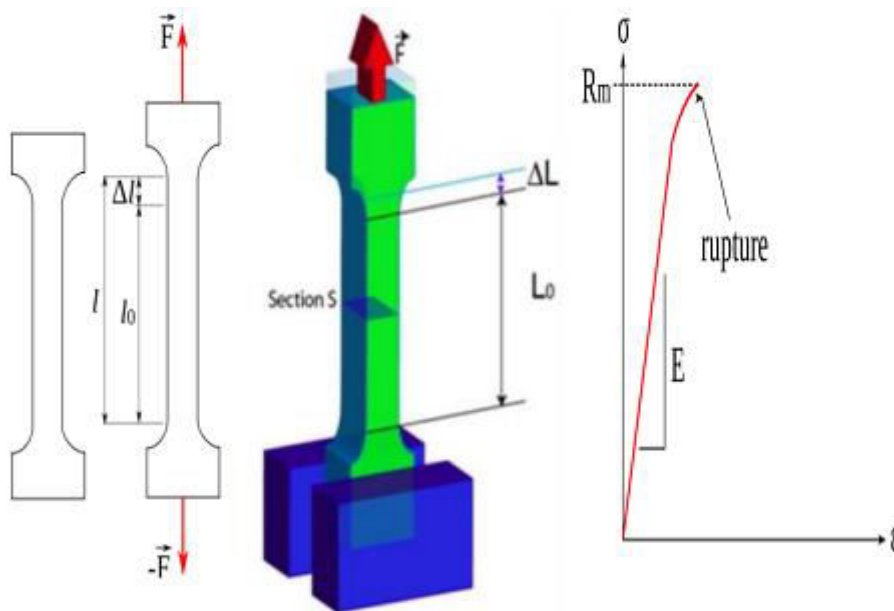
L : la déformation de l'éprouvette déformée (mm).

Le module d'élasticité ou le module de Young E est déterminé entre deux valeurs de la déformation dans la région linéaire de la courbe contrainte déformation

$$E = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\epsilon_2 - \epsilon_1} \dots\dots\dots(IV.3)$$

$$E = \sigma / \epsilon = (F * L_0) / (S * \Delta L) \dots\dots\dots(IV.4)$$

$\Delta L$  : L'allongement des éprouvettes ( $L - L_0$ ) (mm).



**Fig. IV.14.** Principe de l'essai de traction

## 1. Introduction

Dans ce chapitre, Les résultats expérimentaux obtenus des différents tests effectués, seront présentés et interprétés, nous discutons l'évolution des caractéristiques mécaniques des stratifiées en fonction paramètres de leur élaboration (à températures et pressions augment ). Les faciès de rupture de stratifiée (PP/Jute) sont également présentées et discutées en fonction des caractéristiques mécaniques.

## 2. Caractérisations mécaniques

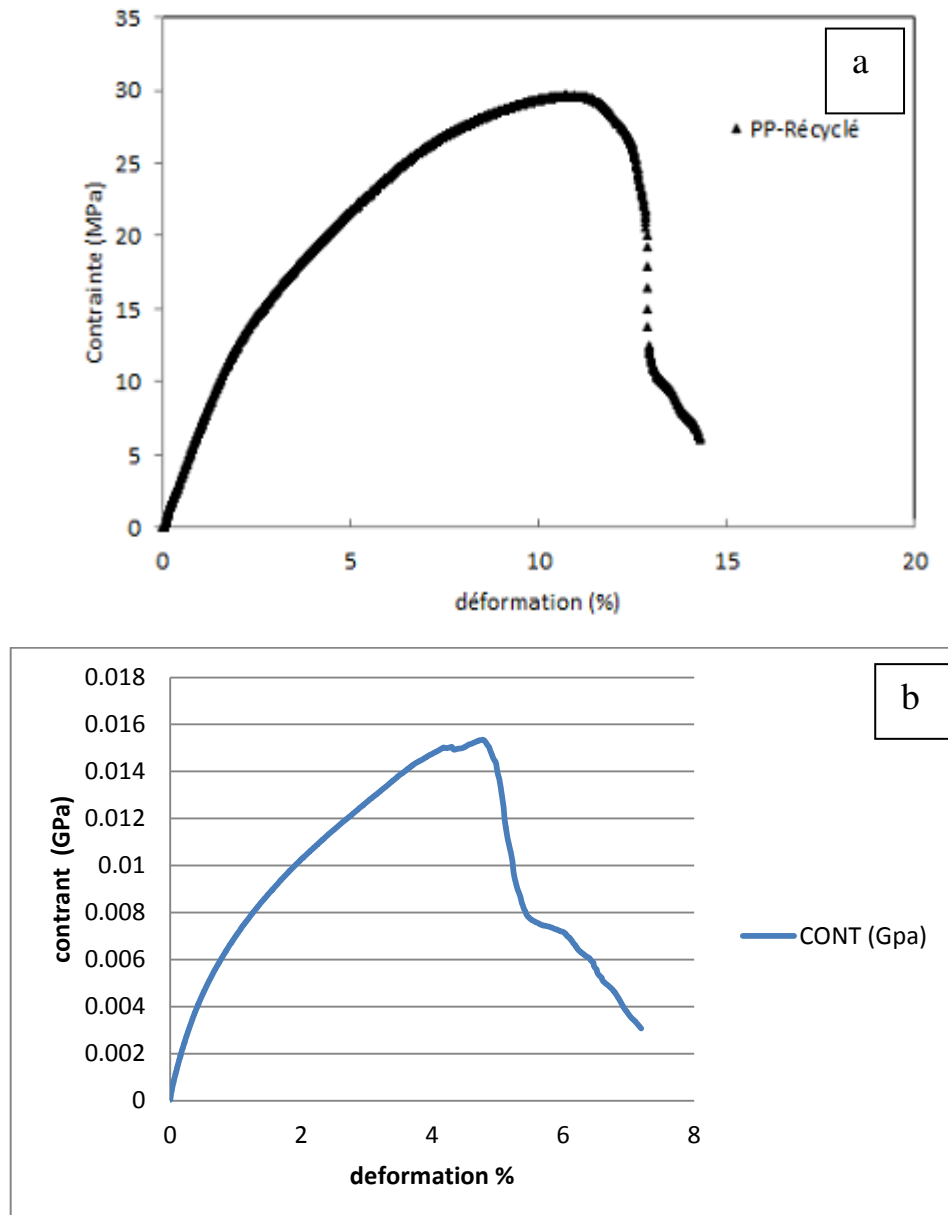
Dans ce paragraphe, les résultats des tests mécaniques, obtenus à la suite d'essai de traction stratifiées, sont illustrés et discutés.

### 2.1. Analyse des courbes Charge - déplacement

La figure V.1 a et b illustrent les évolutions typiques de la contrainte en fonction de la déformation des éprouvettes Polypropylène recyclé (PP) et PP/Jute sollicitées en traction statique, respectivement. Le test des éprouvettes en Polypropylène recyclée sans renfort soumises en traction statique (**Fig. V.1.a**) montre un comportement ductile (la contrainte varie d'une façon non linéaire en fonction de la déformation) [30]. Ce comportement change d'une façon remarquable dans le cas du renforcement du Polypropylène recyclé par des fibres de Jute (**Fig. V.1.b**). Dans ce cas, la ductilité du matériau stratifié est très réduite, est une linéarité est observée ni au moins dans une zone élastique. De même, le matériau stratifié à fibres de Jute se rompe d'une manière fragile une fois la charge maximale est atteinte.

### 2.2. Paramètres de rupture

Les résultats des tests en traction statique sur les différents stratifiées PP/Jute élaborés montrent que la variation de la température ainsi que la pression, lors de l'élaboration de nos stratifiées ont un effet significatif sur les paramètres de rupture de ses derniers.



**Fig. V.1.** Evolution de la contrainte en fonction de la déformation  
 a) Polypropylène recyclée sans renfort [30], b) PP/Jute en traction.

### 3. Résultats de l'essai i de traction sur les stratifiés

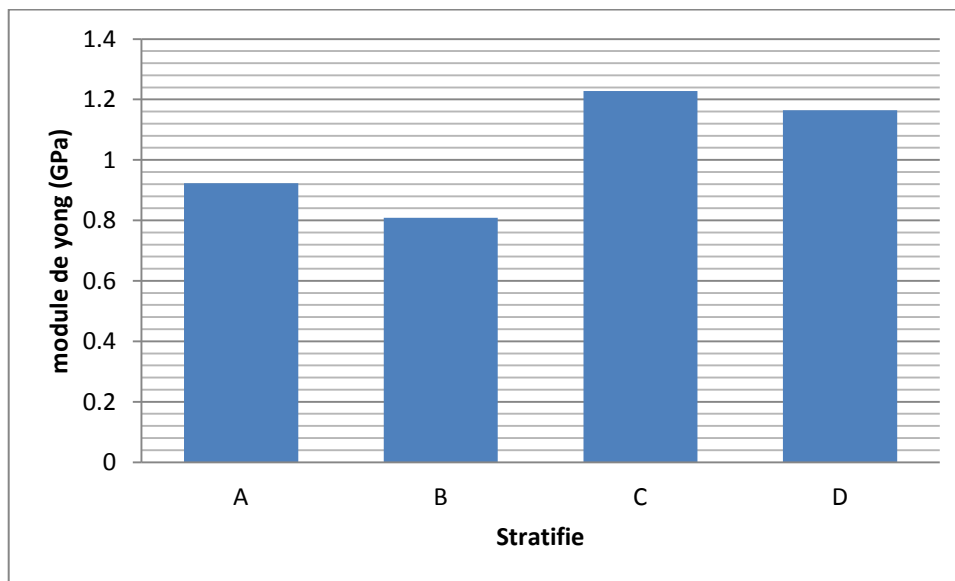
Les résultats de l'essai de traction sur les stratifiés  $[0_2/\pm 45]_s$ ,  $[0_2/\pm 30]_s$ ,  $[0_2/\pm 55]_s$  et  $[0_4]_s$  sont présentés dans (Tab V.2). L'allure générale de la courbe est identique. La courbe à faible déformation initialement linéaire jusqu'au point de rupture, cette partie de la courbe représente le comportement élastique des stratifiés  $[0_2/\pm 45]_s$ ,  $[0_2/\pm 30]_s$ ,  $[0_2/\pm 55]_s$  et  $[0_4]_s$ . À partir de 70 % de la résistance, le module d'Young et la charge diminuent progressivement, cette diminution est directement liée à la présence de microfissures dans cette partie non-linéaire des courbes. Afin de quantifier l'influence de la direction de sollicitation, nous avons déterminé à partir de

ces courbes expérimentales le module d'Young et la charge maximale dans les directions. Les résistances à la traction déterminées à partir des essais.

Orientation	Contraint max (MPa)	Déformation à la rupture (%)	Module d'élasticité (GPa)
A $[0_2/\pm 45]_s$	15,370	7,191	0,923
B $[0_2/\pm 30]_s$	14,625	6,710	0,800
C $[0_2/\pm 55]_s$	16,864	5,875	1,228
D $[0_4]_s$	19,051	5,295	1,164

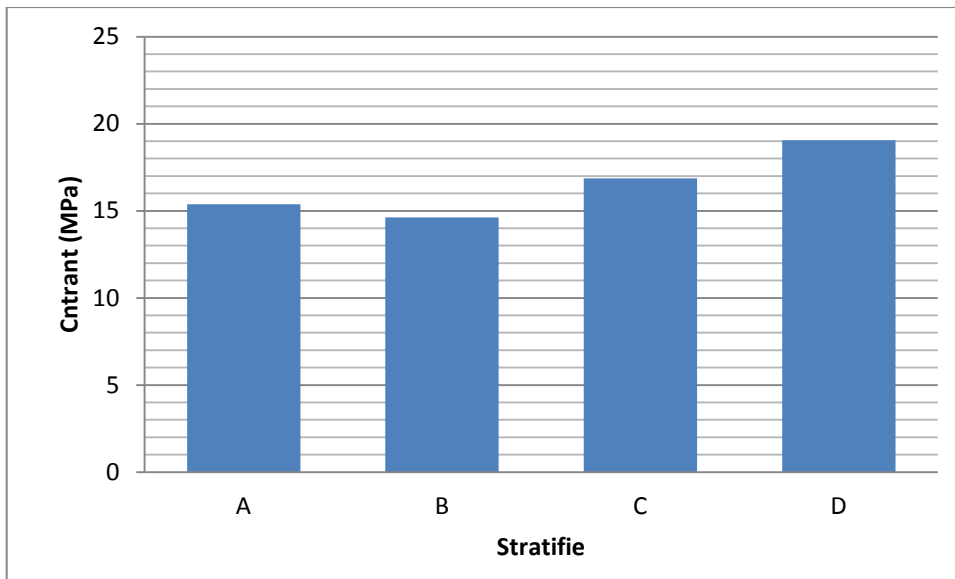
**Tab V.1.** *Caractéristiques mécaniques de l'essai de traction sur les stratifiés*

L'histogramme de la **figure V.2** montre que, le module de Young des stratifiés PP/Jute est fortement influencé par d'élaboration. Comme on peut le voir sur cette figure (**Fig. V.3**), le stratifié C  $[0_2/\pm 55]_s$  est plus rigide, cela semble être dû à l'orientation à  $55^\circ$  qui favorise l'obtention de tel module (1,228 GPa). Bien que l'orientation à  $0^\circ$  favorise le module de Young, alors que dans notre cas, le matériau D  $[0_4]_s$  enregistre une valeur de 1,164 GPa qui est base comparée à celle de stratifiés C  $[0_2/\pm 55]_s$ .



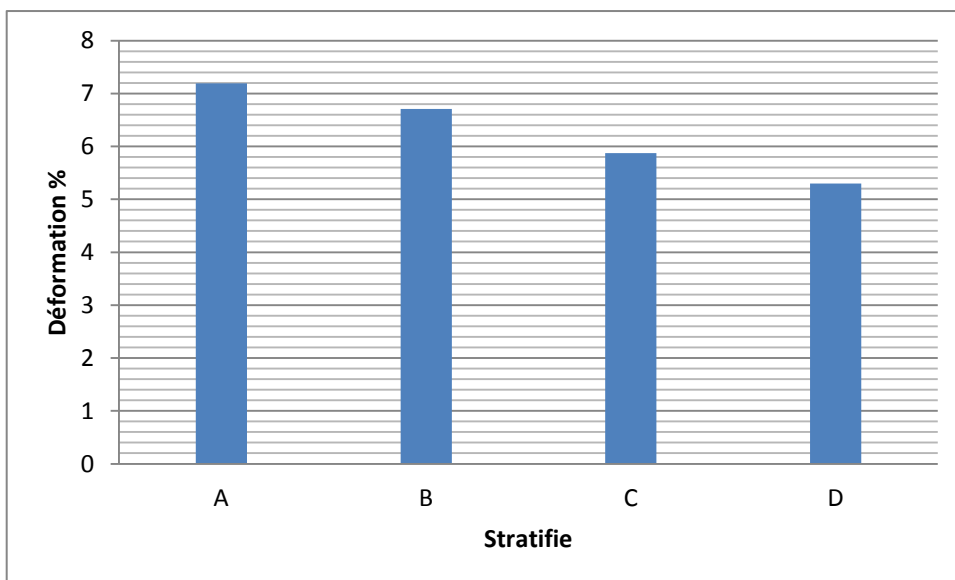
**Fig. V.2.** *histogrammes de l'évolution des module du Yong des stratifiés PP/Jute A)  $[0_2/\pm 45]_s$ , B)  $[0_2/\pm 30]_s$ , C)  $[0_2/\pm 55]_s$  et D)  $[0_4]_s$ .*

L'histogramme de la **figure. V.3** illustre l'évolution des contraintes des différentes éprouvettes PP/Jute. Cette figure montre que le stratifié D  $[0_4]_s$  présent le contrant la plus élevée comparée au autres stratifiés, cela semble être dû a l'orientation des fibres qui sont optimale . En deuxième position on trouve le matériau C  $[0_2/55]_s$  avec une rigidité de 16,839 (MPa), alors que les deux autres matériaux présentant des valeurs réduites.



**Fig. V.3.** histogrammes de l'évolution des contraintes des stratifiés PP/Jute  
A)  $[0_2/\pm 45]_S$ , B)  $[0_2/\pm 30]_S$ , C)  $[0_2/\pm 55]_S$  et D)  $[0_4]_S$ .

Contrairement à la rigidité et à la contrainte, les matériaux A  $[0_2/\pm 45]_S$  et B  $[0_2/\pm 30]_S$  présentent les allongements à la rupture les plus importants soit : 7,191% et 6,710% respectivement, cela du à l'orientation à  $45^\circ$  et  $30^\circ$  qui favorise le déformation du matériaux avant rupture.



**Fig. V.4.** Histogrammes de l'évolution des allongements des stratifiés PP/Jute  
A)  $[0_2/\pm 45]_S$ , B)  $[0_2/\pm 30]_S$ , C)  $[0_2/\pm 55]_S$  et D)  $[0_4]_S$ .

# **PARTIE NUMERIQUE**

---

## 1. Introduction

Aujourd'hui, la technologie informatique aide à résoudre les problèmes les plus complexes. Il est utilisé efficacement non seulement pour l'analyse structurelle, mais aussi pour un large éventail de phénomènes tels que statique (structurel, fluage, fatigue, fracture). Dynamique (linéaire et non linéaire), vibration et bruit, transfert de chaleur, écoulement de fluide; En plus des procédés de fabrication tels que le moulage par injection et le formage des métaux [37].

Dans ce chapitre, on présente la simulation des essais de façon général dans le champ d'étude des matériaux est le code ANSYS.

## 2. Définition d'ANSYS

ANSYS est un code qui résout les problèmes de divers champs par la technique des éléments finis. Cette étude repose principalement sur ANSYS et sur les résultats trouvés, et il faut toujours comparer avec des essais réels pour bien soutenir les faits exprimés ici. On va se concentrer sur les résultats des stratifiés obtenus pour les contraintes et déplacements en traction statique [37].

## 3. Présentation d'ANSYS

Pour déterminer les distributions des contraintes, le logiciel ANSYS a été adopté. Ce code général de calcul est basé sur la méthode des Eléments Finis et conçu pour l'analyse des structures. Il permet de traiter des problèmes d'élasticité linéaire, et non linéaires (élastovisco-plastique), des problèmes dynamiques transitoires et stationnaires, des problèmes thermiques transitoires et stationnaires, des problèmes mécaniques du fluide et des problèmes acoustiques [30].

Pour effectuer un calcul, ce logiciel passe par trois stades :

- **Stade I** : définition de la géométrie du modèle.
  1. Introduction des éléments convenables pour le type d'analyse considéré.
  2. Définition des données caractérisant le modèle :
- ✓ Coefficients des matériaux utilisés pour le modèle.
- ✓ Construction de la géométrie dans les cas bidimensionnel et tridimensionnel (surfaces, volumes et combinaison des surfaces et volumes).
- ✓ Maillages du modèle considéré.

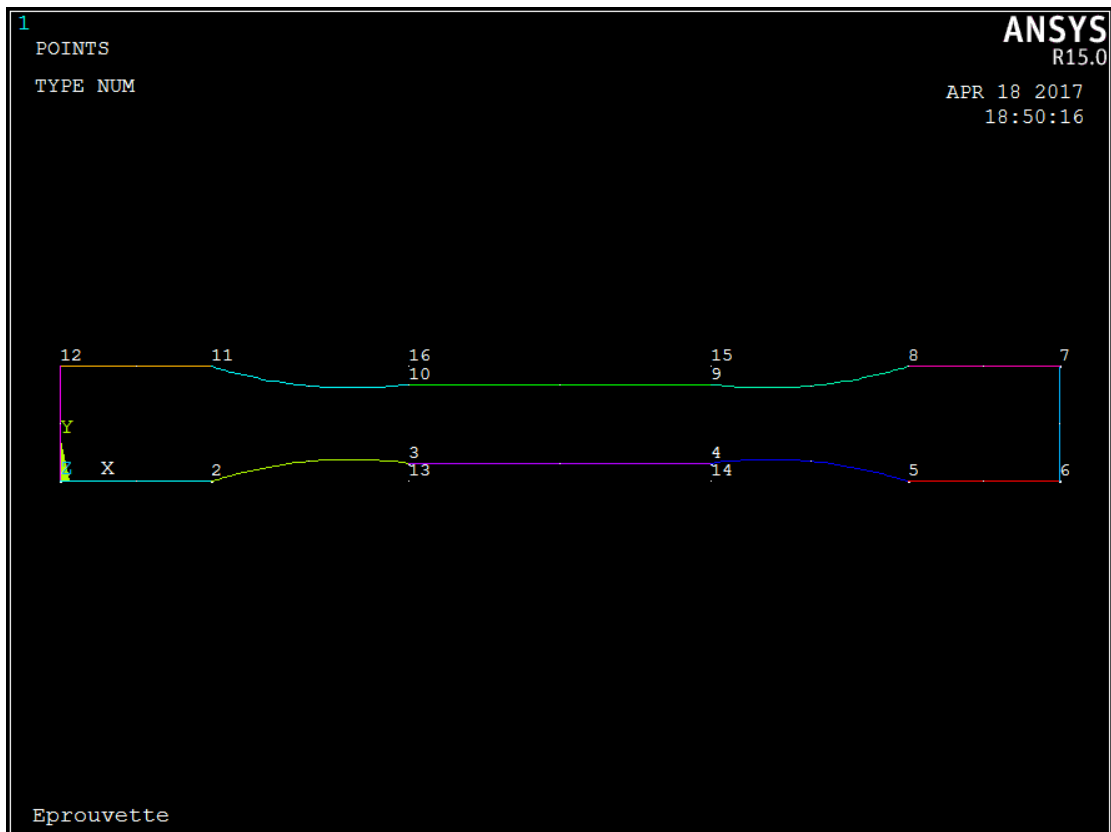
- ✓ Vérification des tailles de maillages obtenues.
- **Stade II** : solution du problème défini.
- ✓ Application des conditions aux limites.
- ✓ Application des chargements.
- ✓ Arrangement des types d'analyse.
- ✓ Vérification complète du modèle avant la solution.
- ✓ Solution du problème :
  - Assemblage des matrices de rigidité et de masse de la structure complète.
  - Application des conditions aux limites.
  - Application des chargements externes.
- **Stade III** : analyse et post-traitement des résultats qui peuvent être, soient des quantités locales tels les déplacements, les contraintes, les déformations, soient des quantités globales, telle l'énergie de déformation.

#### **4. Simulation par le code commercial ANSYS**

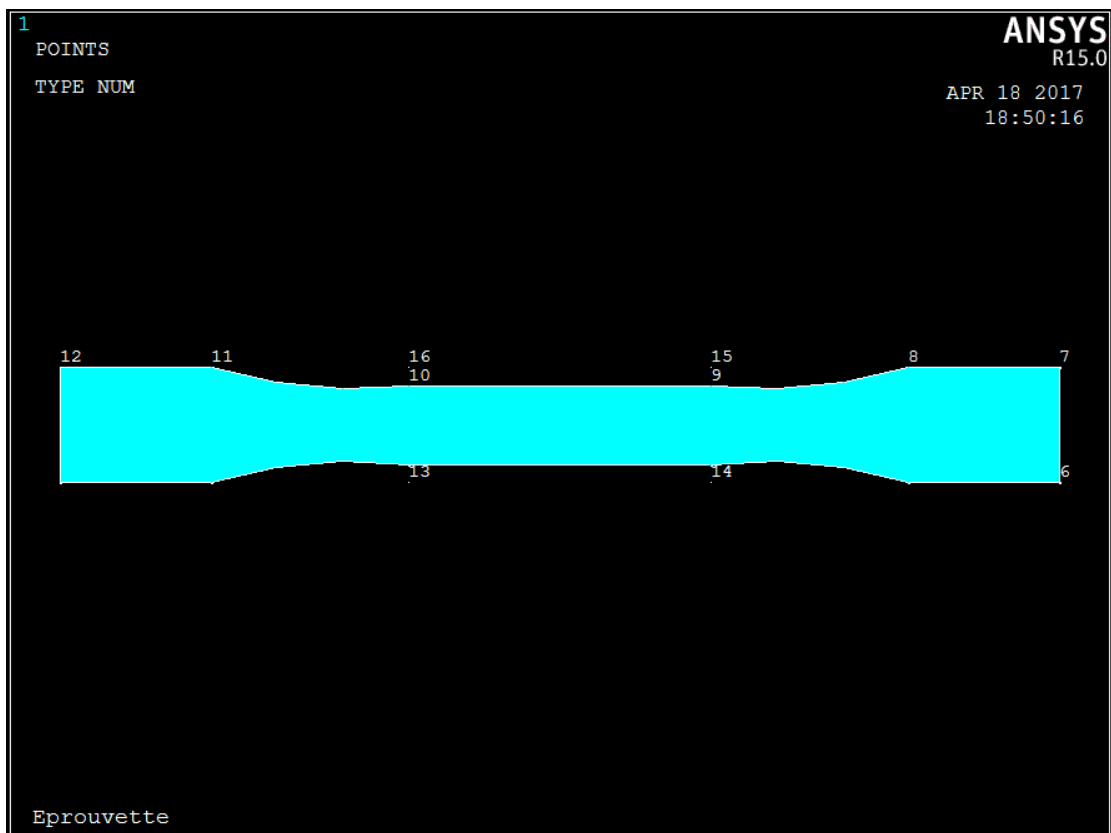
La simulation de cet essai a été faite par le logiciel de simulation par éléments finis ANSYS. Ce logiciel est très important dans le champ des simulations pour obtenir des résultats sur les diverses variables, et pouvoir comprendre le comportement des matériaux. Pendant cette étude, on va changer les différents paramètres pour connaître l'effet de ceux-ci dans les résultats numériques obtenus. Les paramètres choisis pour l'étude sont le maillage, le coefficient de poisson et module de Young.

##### **4.1. Géométrie**

Dans notre étude, nous avons utilisé les dimensions des mêmes éprouvettes citées dans la partie expérimentales selon ASTM D638-03 dans le code ANSYS en citées les coordonnées de chaque point et liée entre elle (**Fig. V.5**) et présente la vue globale (**Fig. V.6**).



**Fig. V.5.** Intégration des dimensions de l'éprouvette dans la base ANSYS.



**Fig. 6.** Vue globale de l'éprouvette en utilisant ANSYS.

Toutes les dimensions sont exprimées en millimètres et l'épaisseur  $e=8\text{mm}$

## 4.2. Choix de l'élément type

### ➤ Géométrie de l'élément SHELL181 (Bibliothèque de l'ANSYS)

Pour modéliser les couches orthotropes de notre modèle réalisé dans l'étude expérimentale, on a l'élément type de la bibliothèque SHELL181 montré dans la figure V.7.

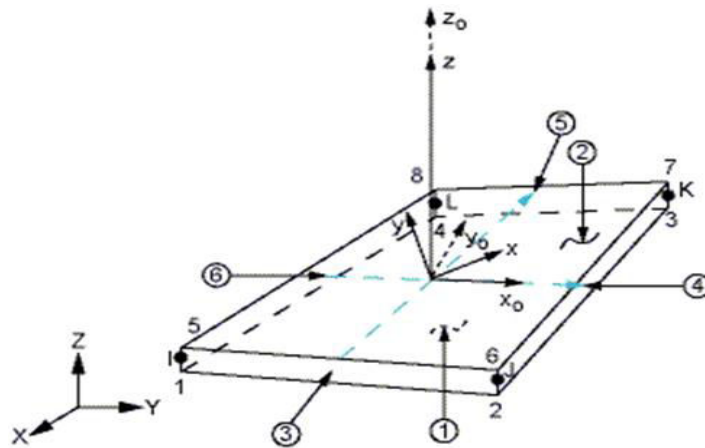


Fig. V. 7. L'élément type SHELL181 choisie pour modéliser les couches orthotropes

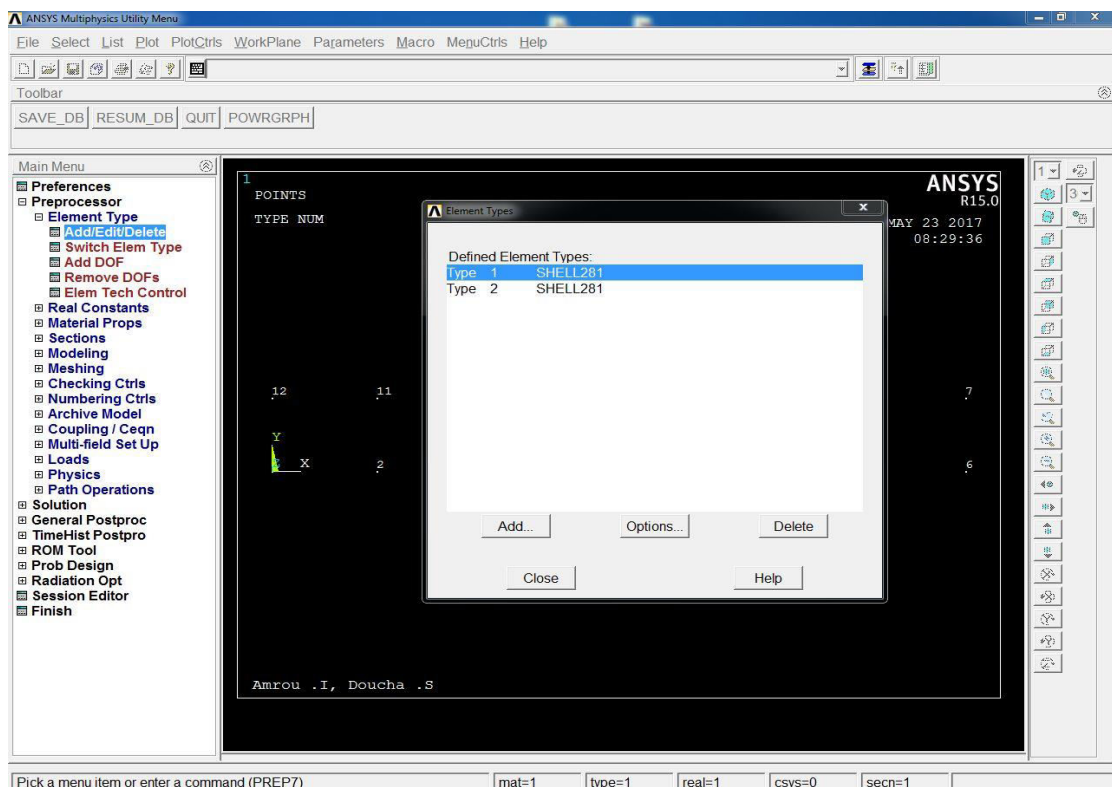


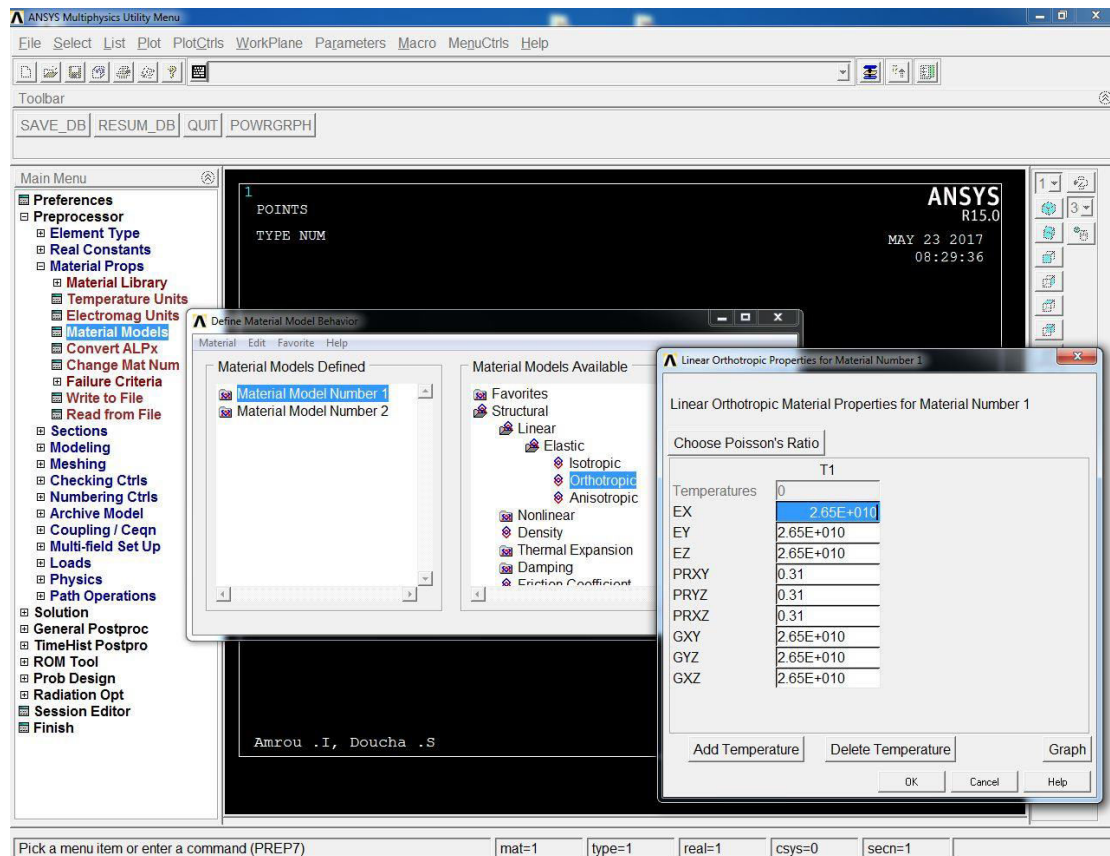
Fig. V.8. La commande d'insertion de l'élément SHELL 181.

### 4.3. Propriété des matériaux

La commande montrée dans la figure V.6 permet d'insère les propriétés mécaniques de PP et de Jute (Tableau V.2)

	E( GPa)	$\nu$	$\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )
Jute	26.5	4,7	0.92
PP	1.2		1.30

**Tab V.2.** *Caractéristiques mécaniques de PP/Jute*



**Fig. V.9.** *Insertion des propriétés mécaniques*

### 4.4. Insertion des couches orthotropes

On déclare les propriétés mécaniques de chaque couche d'un stratifié utilise

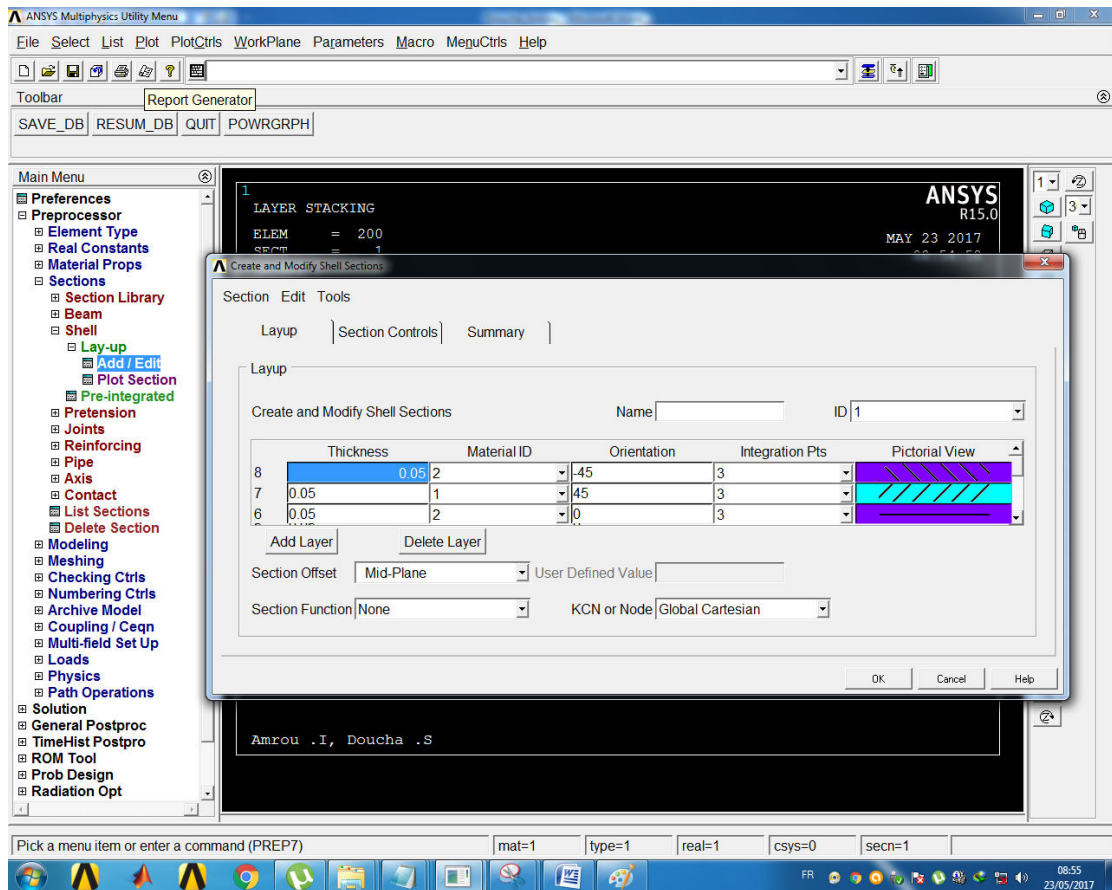
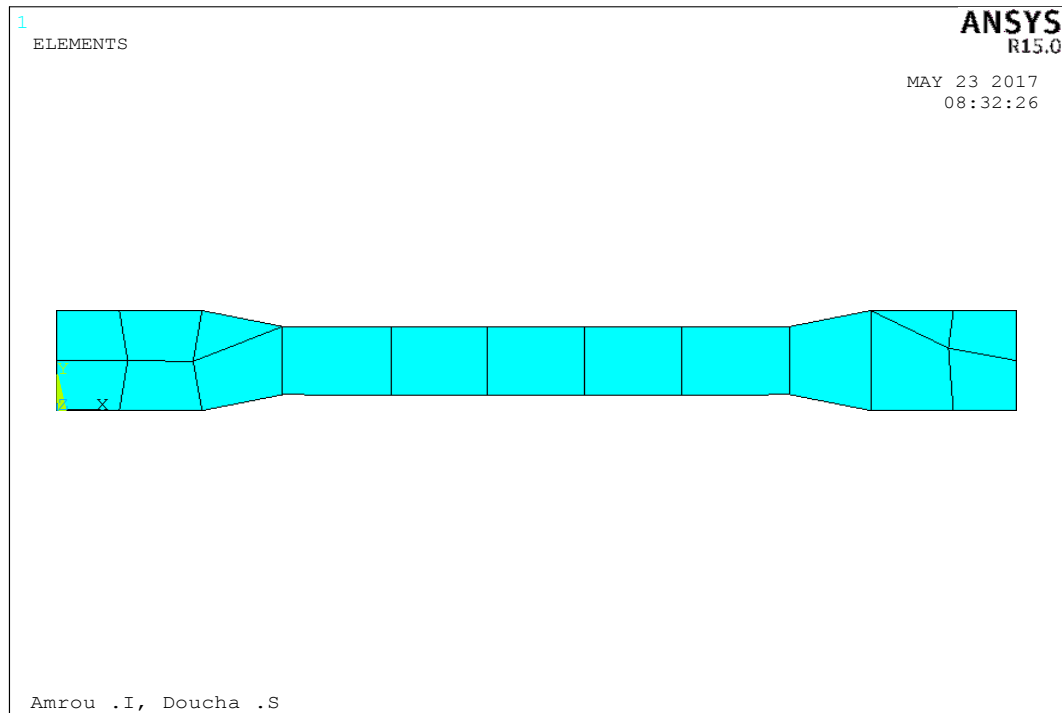


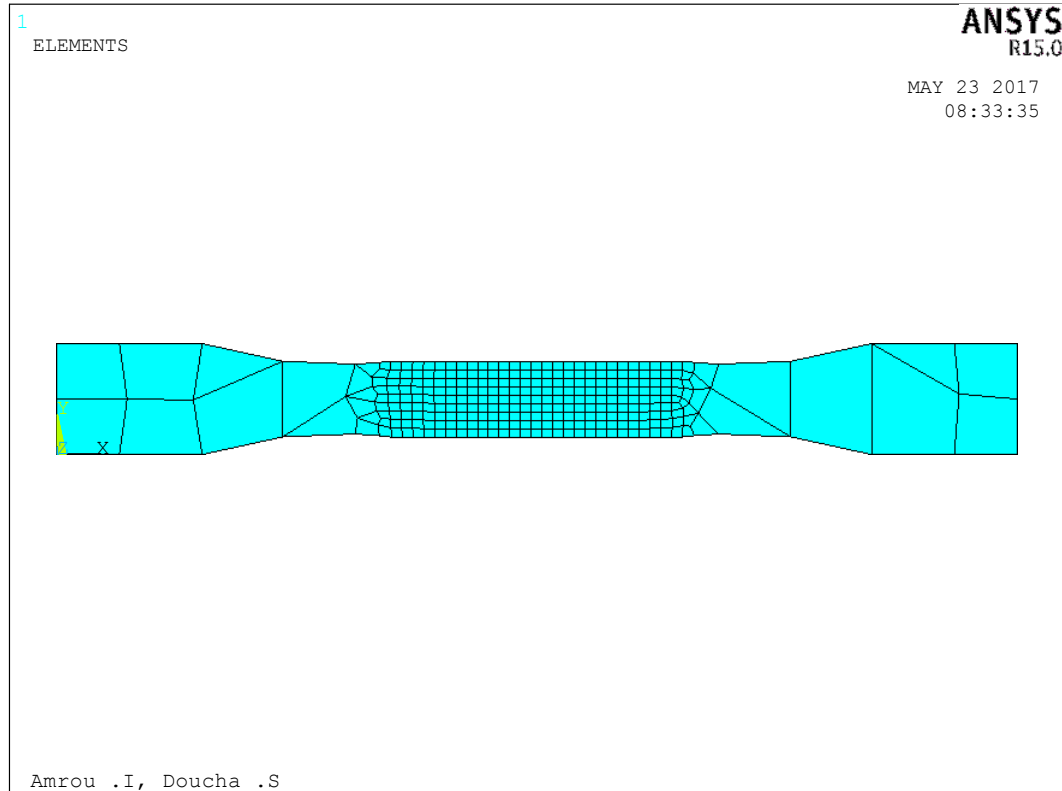
Fig. V.10. Insertion des couches orthotropes

#### 4.5. Maillage

Dans ce travail, nous avons utilisé un maillage quadratique parce que ce maillage nous permet une répétition régulière de motifs identiques (Fig. V.11). Pour en savoir le maillage pour donner une valeur approximative de contrainte par apport la valeur expérimental. Par ailleurs, le maillage 1115 nœuds et 132 éléments représenter le meilleur choix qui donner les valeurs plus proche par rapport l'expérimental (Fig. V.12).



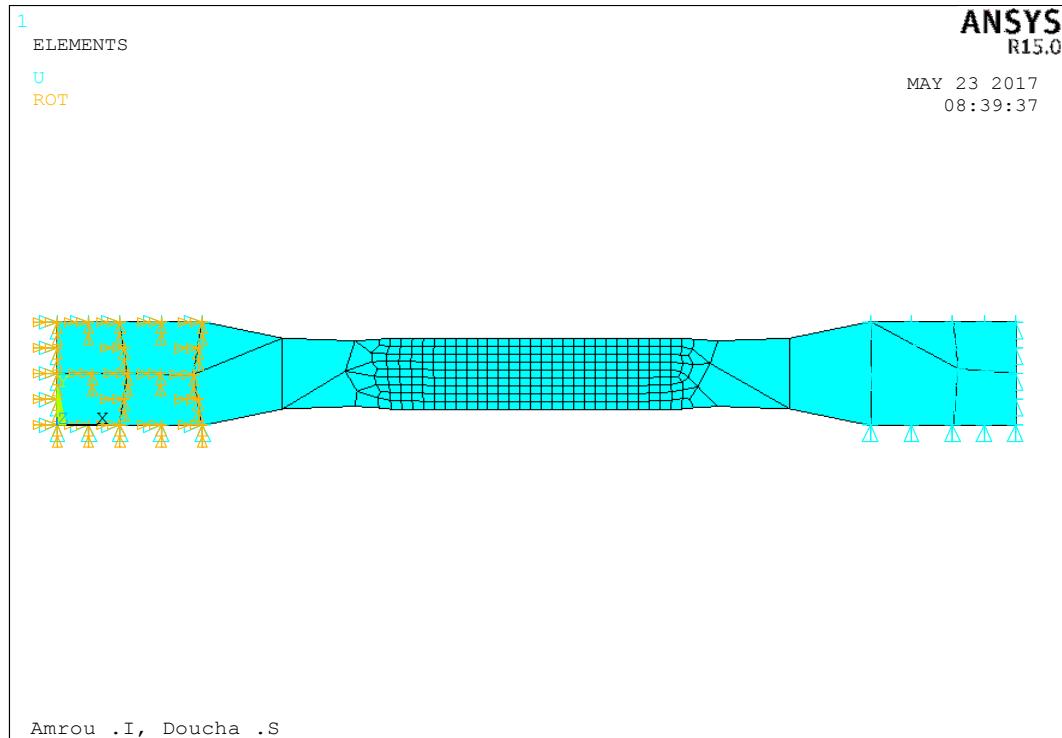
**Fig. V.11.** *Maillage par défaut de l'éprouvette*



**Fig. A.12.** *Le maillage raffiné de la zone de rupture*

#### 4.6. Conditions aux limites

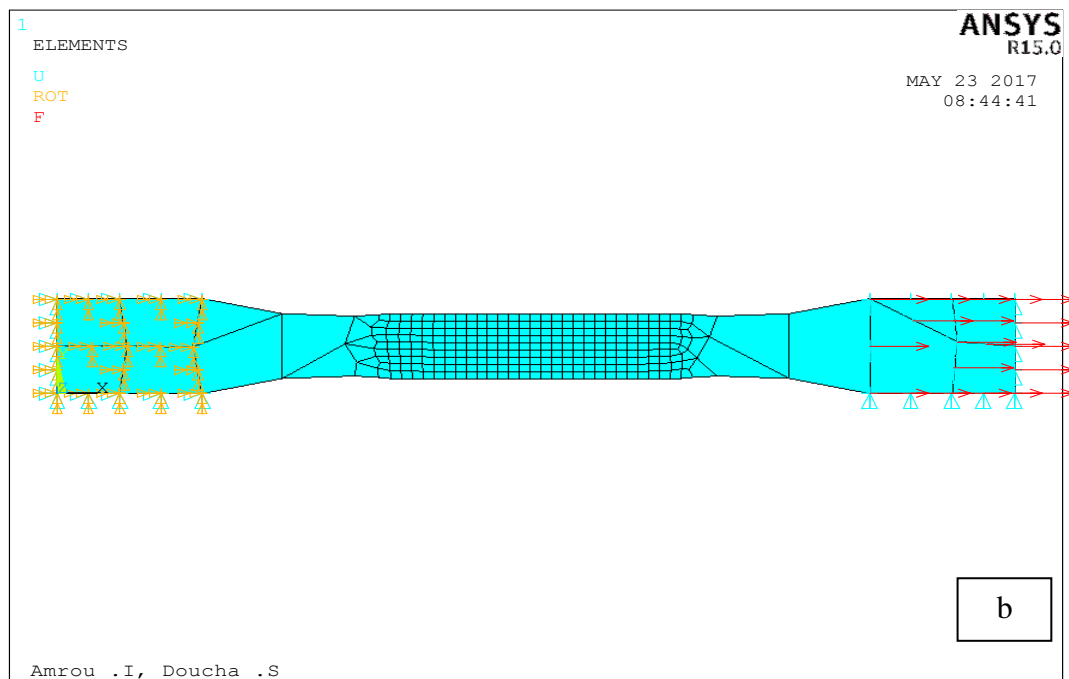
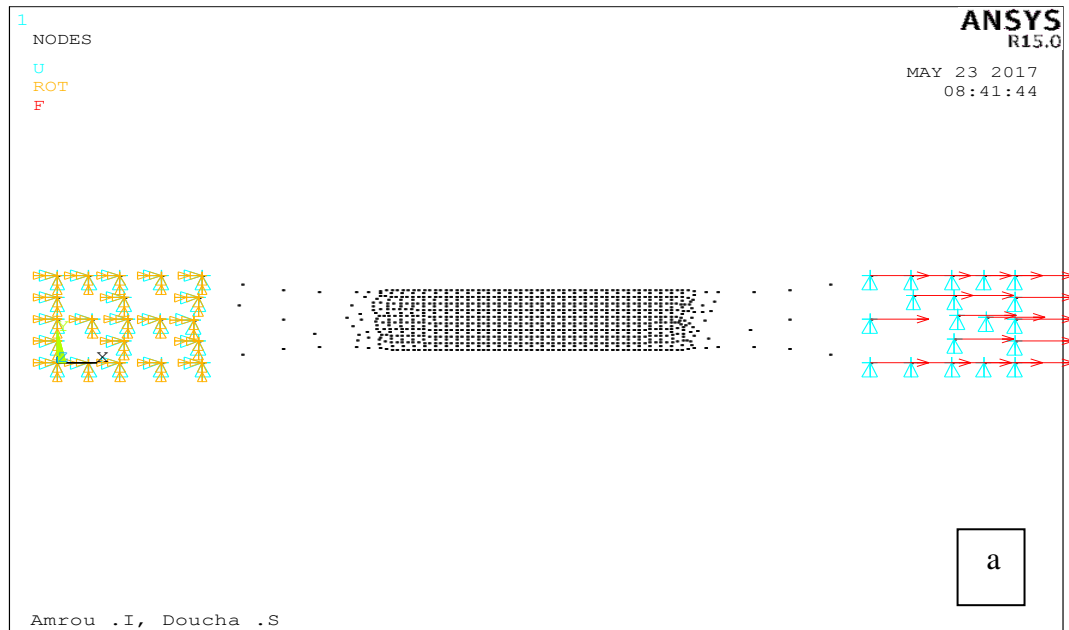
On effectué les degrés des libertés de chaque nœud pour éliminer tous les DDL dans les nœuds de la zone de fixation et tous les DDL sauf UX de la zone de l'application des charges (X, Y, Z).



**Fig. V.13.** *Condition aux limites*

#### 4.7. Application des charges

On applique une charge sur chaque nœud de la zone de l'application de valeur 20KN selon la d traction (X) .



**Fig. V.14.** Application des charges de 20KN ( a : schéma des nœuds, b : schéma du structure)

### 4.8. Solution

Les commandes de solution montrées dans les deux figures (V. 15, V.16) permettent de finaliser notre simulation et modélisation et d'obtenir les résultats.

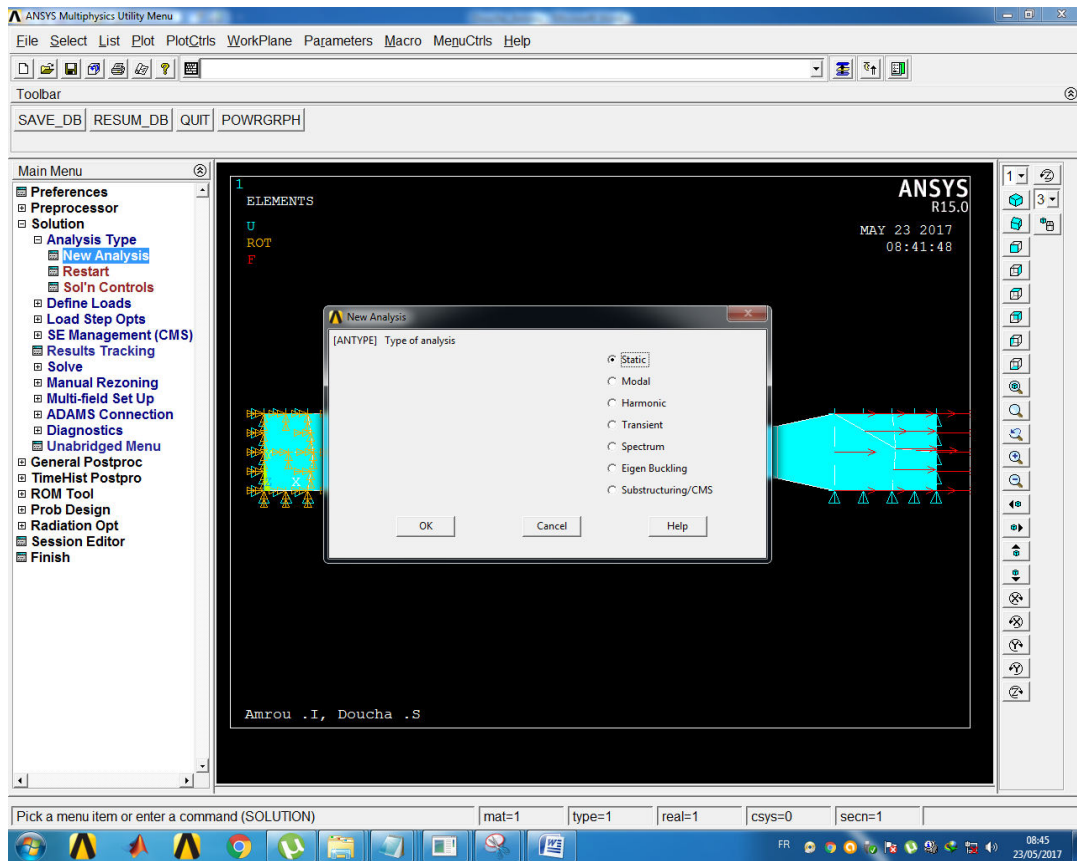


Fig. V.15. Choix de l'analyse statique

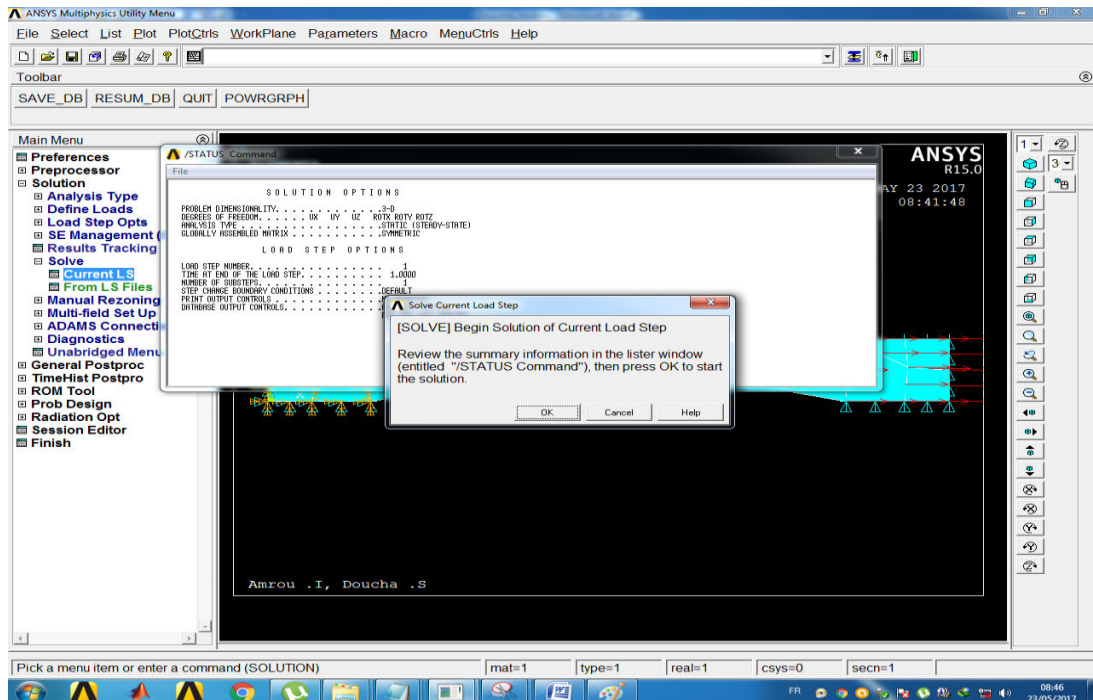
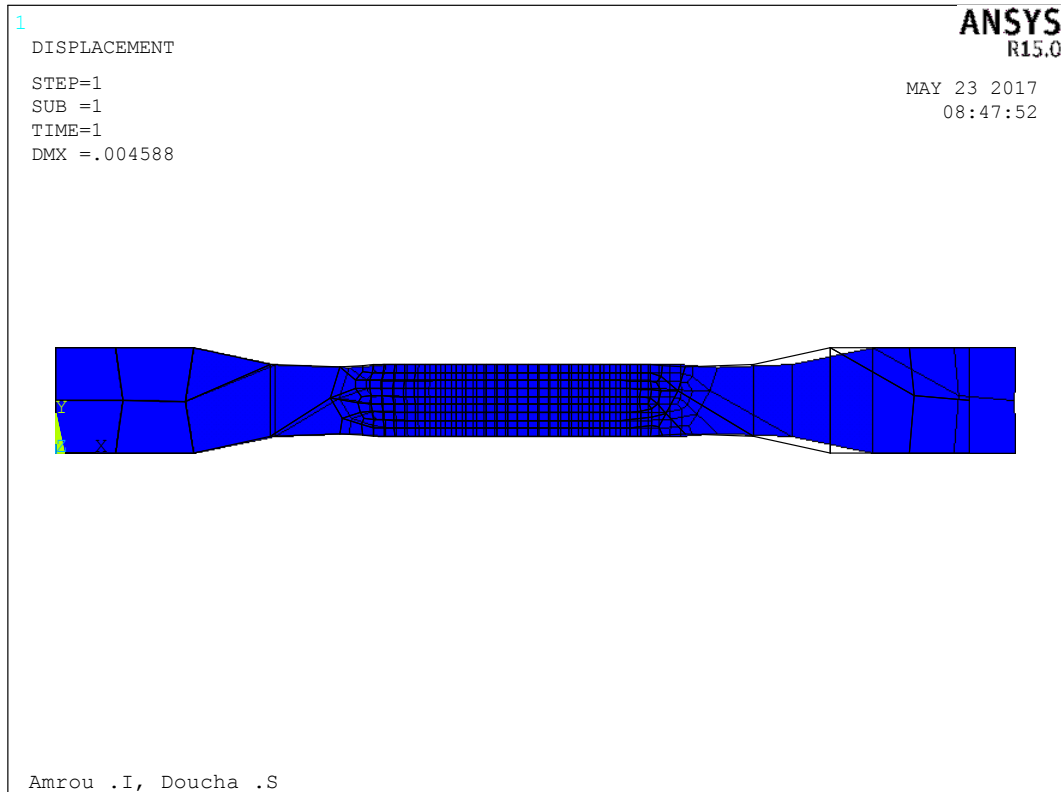


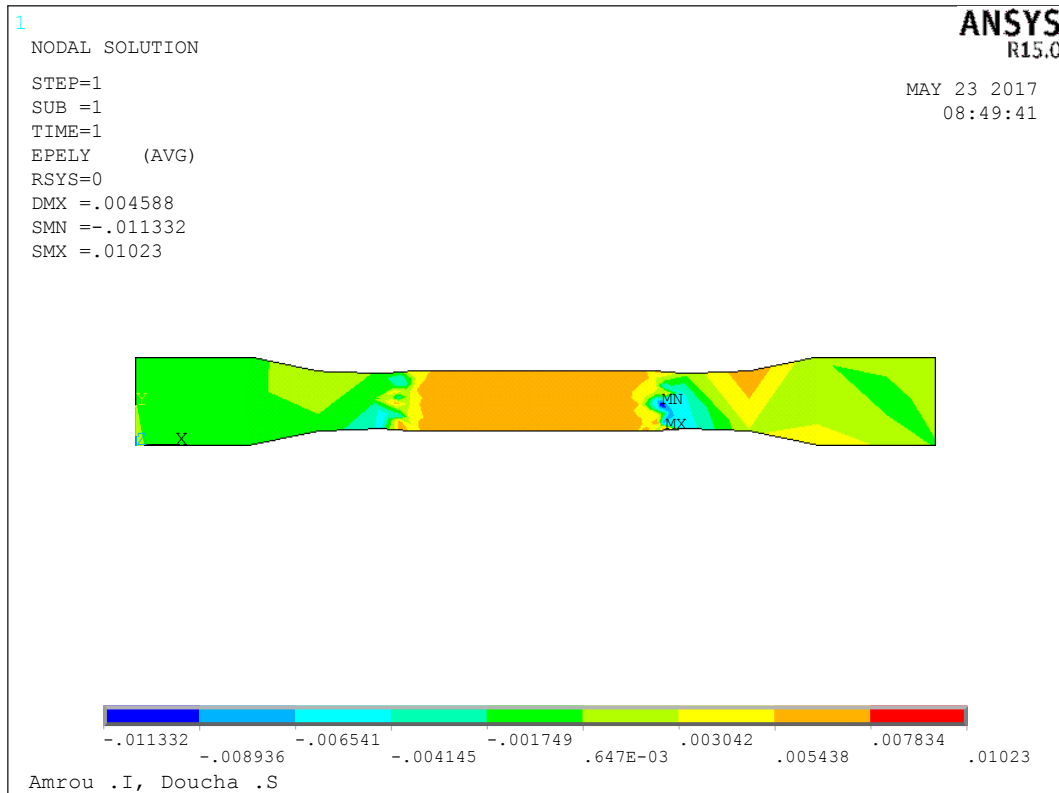
Fig. V.16. Lancement des calculs

**La figure V.13.** Suivante présente la dilatation de l'éprouvette et la déformation aux niveaux des nœu



**Fig. V.17.** Comparaison de l'état initiale et l'état finale de l'éprouvette

**La figure (V.18)** suivante montrée la variation de déformation selon l'axe (UX).



**Fig. V.18.** La variation de déformation selon (UX)

### Calcul de module de Young

La valeur numérique de l'allongement est  $0.006504 \text{ m} = 6.504 \text{ mm}$ , d'après les formules (IV.4)

On a :

$$E=0.808 \text{ GPa}$$

Les résultats expérimentaux sont validés par les résultats numériques obtenus par la simulation et la modélisation par le code ANSYS apdl

## Conclusion générale

Les matériaux composites à matrice thermoplastique renforcés par des fibres naturelles sont de plus en plus utilisés grâce à leurs multiples avantages. Notre travail traite le vif de ce sujet tous en proposant la variation de l'angle d'orientation des plis lors de l'élaboration de tels matériaux. En vertu de notre collaboration, nous présentons la conclusion suivante :

Les résultats des tests en traction statique sur les différents stratifiés PP/Jute élaborés montrent que la variation de l'orientation des plis lors de l'élaboration de tels matériaux de nos stratifié a un effet significatif sur les paramètres de rupture de ses derniers.

Les résultats de l'essai de traction sur les stratifiés  $[0_2/\pm 45]_s$ ,  $[0_2/\pm 30]_s$ ,  $[0_2/\pm 55]_s$  et  $[0_4]_s$  montrent que le comportement des différents stratifiés est identique (comportement linéaire élastique). Alors que du côté performances, **le stratifié C  $[0_2/\pm 55]_s$**  est plus rigide, le stratifiés **D  $[0_4]_s$**  a la contrainte la plus élevée, suivi du matériau C  $[0_2/\pm 55]_s$ . Alors que, La réduction de l'allongement à la rupture est due à l'effet d'orientation. Les deux matériaux A  $[0_2/\pm 45]_s$  et B  $[0_2/\pm 30]_s$  favorisent de bons allongements à la rupture.

Une bonne concordance entre les résultats expérimentaux et les simulations valide notre démarche de modélisation en utilisant le code de calcul ANSYS.

## Références Bibliographiques

- [1] : Adil. SBIAI. Matériaux Composites A Matrice Epoxyde Chargée Par Des Fibres De Palmier Dattier : Effet De L'oxydation Au Tempo Sur Les Fibres/Année 2011/ Thèse.
- [2] : Romain. BRAULT. /Étude du comportement mécanique des matériaux composites par corrélation volumique : Application à l'analyse des effets du cisaillement transverse/le : vendredi 04 octobre 2013/ THÈSE.
- [3] : Bourouis Fairouz. Etude Du Comportement Mécanique De Structures Sandwiches A Différents Matériaux De Revêtements/ /2009/Mémoire.
- [4] : Anh Vu Nguyen. Matériaux composites à renfort végétal pour l'amélioration des performances de systèmes robotiques. Autre. Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II, 2015. Français.
- [5] : Zouhair SADOUNE. Modélisation et simulation des matériaux composites Piézoélectriques Cas du SiO<sub>2</sub>/. Le 30 Novembre 2013/
- [6] : Jean-Marie Berthelot. Mécanique des Matériaux et Structures Composites.
- [7] : Laurent Gornet. Généralités sur les matériaux composites. Engineering school. 2008.
- [8] : ROUAM Kamila. République algérienne démocratique et populaire ministre de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique Université M'HAMED BOUGARA – BOUMERDE (2013/2014) Mémoire de Magister.
- [9] : Rokbi. M, «Comportement à la rupture et caractérisation mécanique de composites polyester-fibres de verre», thèse Magister, M'sila, 2001.
- [10] : David Violeau. Une stratégie de calcul pour l'analyse `a l'`échelle "micro" des endommagements jusqu'`a rupture des composites stratifiés. M'`mécanique [physics.med-ph]. Ecole normale `supérieure de Cachan - ENS Cachan, 2007. Français.
- [11] : CHAPITRE 13 : Généralités sur la Théorie des Stratifiés.
- [12] : BOUMRAR AKLI. Détection et localisation d'endommagements des structures mécaniques linéaires par mesures vibratoires /le25 -02-2014 / Thèse.
- [13] : Jean-Marie Berthelot Mécanique des Matériaux et Structures Composites.
- [14] : I. Van de Weyenberg, T. Chi Truong, B. Vangrimde et I. Verpoest, *Improving the properties of UD flax fibre reinforced composites by applying an alkaline treatment*, Composites Part A, 2006, pp. 1368-1376.
- [15]: P.J. Herrera-Franco et A. Valadez-Gonzalez, *A study of the mechanical properties of short natural-fiber reinforced composites*, Composites Part B, 2005, pp. 597-608.

- [16] : Mokhtari Ahcene THESE de Doctorat ‘‘ modelisation du comportement et de l’endommagement des composites a matrice thermoplastique’’ Univ mouloud mammeri tizi-ouzou
- [17] : CARMA ‘centre d’animation regional en matriaux avaces ‘ , ‘‘glossare matriaux composites ‘’ 2006
- [18] : G. Maeder, *De la difficulté d’introduire des polymères et composites dans l’industrie automobile*, 2003.
- [19] : Gay, D., "Matériaux composites". *Édition Hermes*. 1997.
- [20] : N. Chevalier. Projet Toupie : cahier des charges matériau et sélection matériau, rapport n°DITT-08-0248, 2008.
- [21] : Kausch H.H, Heymans N., Plummer C.J., Decroly P., Matériaux polymères : propriétés mécaniques et physiques, *Traité des matériaux*, vol. 14. Presses
- [22] : C. Oudet, *Polymères : structure et propriétés*, Masson, 1994.
- [23] : F. Michaud, ‘‘Rhéologie de panneaux composites bois/thermoplastiques sous chargement thermomécanique : Aptitude post formage’’ thèse Phd, univ Laval, 2003.
- [24] : A. Y. Nénonene, ‘‘Elaboration et caractérisation mécanique de panneaux de particules de tige de kéraf et de bio adhésifs à base de colle d’os, de tannin ou de mucilage’’, thèse de doctorat de l’université de Toulouse, Institut National Poly technique de Toulouse, Sciences des Agro ressources, 2009.
- [25] : K.Charle, C.morvan, J.Bréard, JP.Jernot, M.Gomina, ‘‘Etude morphologique d’un composite naturel la fibre de lin’’ revue des composites et des matériaux avancées, Vol16, pp11-24,2006
- [26]: C.Ververis, K.Georghiou, N.Christodoulakis, P. Santas, R.Santas.’’ Fiber dimensions, lignin and cellulose content of various plant materials and their Suitability for paper production. *Industrial Crops and Products* 19: 245–254, 2004.
- [27] : Yahiaoui Lamia ‘‘ Caractérisation d’un composite à la rupture à base des fibres végétales (Diss)’’ thèse de MAGISTE 2011
- [28]:.K. Bledzki, J. Gassan, ‘‘Composites reinforced with cellulose based fibers’’, *Prog. Polym. Sci.* 1999
- [29] : F.Laurans, A.Déjardin, J.Pilate, ‘‘Physiologie de la formation des parois de fibres de bois’’, *composites et matériaux avancés*, Vol.16, pp.27-39,2006.
- [30] : Khaldoune Abd raouf Mémoire de Master ‘‘ Effet des paramètres d’élaboration sur le comportement mécanique d’un bio-composites ‘‘ Univ de M’SILA 2015 / 1016

- [31] : THIEBAUD. S, «Valorisation chimique de composés lignocellulosiques», thèse de doctorat, Institut National Polytechnique De Toulouse, Sciences des Agro-ressources 1995.
- [32] : Boustingorry. P, «Élaboration d'un matériau composite à matrice gypse renforcé par bois fragmenté -amélioration de la résistance au vissage de produits préfabriqué en gypse», thèse de doctorat, Génie des procédés, 2002.
- [33] : 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.
- [34] : Elouaer Abdelmonem, « Contribution à la compréhension et à la modélisation du comportement mécanique de matériaux composites à renfort en fibres végétales », Thèse de Doctorat de l'Université de Reims Champagne-Ardenne, Janvier 2011.
- [35] : BOUROUIS FAIROUZ .Université Mentouri – Constantine faculté Des Sciences De L'ingénieur Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme de magistère génie mécanique option mécanique appliquée en engineering
- [36] : Bendine kuider, Contribution à l'étude du contrôle actif de structures composites par incorporation des matériaux intelligents, thèse doctorat, université de sidi belabes, 2016.ormulation par la méthode des éléments finis.
- [37] : Mr. Latrache Mohamed. Coure et TP Modélisation et simulation de matériaux Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique Université de M'sila Département de génie mécanique.

## Résume

L'objectif principal de ce projet est de mieux comprendre les phénomènes relatifs à la mise en œuvre et l'utilisation des matériaux stratifiés à base de polypropylène renforcé par des fibres de Jute en utilisant une presse à chaud. Les essais mécaniques sur les stratifiés ont montré que les paramètres de mise en œuvre de nos bio-composites ont un effet significatif sur les paramètres de rupture de tels matériaux. Les résultats des tests en traction statique sont en concordance avec ceux obtenues par modélisation numérique par ANSYS.

## ملخص

الهدف الرئيسي من هذا المشروع هو فهم الظواهر المتعلقة بتنفيذ واستخدام المواد مغلفة البولي بروبيلين عززت الألياف الجوت باستخدام الصحافة الساخنة. وأظهرت الاختبارات الميكانيكية على شرائح أن تنفيذ المعلمات من موقعنا على المركبات الحيوية لها تأثير كبير على المعلمات كسر هذه المواد. نتائج اختبارات الشد ثابتة مماثلة لتلك التي حصلت عليها النمذجة العددية ANSYS.