

**République Algérienne Démocratique et Populaire**  
**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**  
**Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou**  
**Faculté de Génie de la Construction**  
**Département de Génie Mécanique**



***MEMOIRE***  
***DE FIN D'ETUDE***

*En vue de l'obtention du diplôme de Master académique en Génie Mécanique*  
*Option : Génie Des Matériaux*

---

***THEME :***

**Etude de l'influence du nombre et de l'orientation des couches de fibres de verre sur le comportement mécanique d'un stratifié**

---

Proposé par et dirigé par :

Mme.MOHELLEBI.F

Présenté par :

M'said Salim

Co-encadreur :

MMme. MANSOURI. L

**2021/2022**

# *Remerciements*

En premier lieu je remercie le bon dieu de m'avoir donné le courage d'aller au bout de mon objectif.

Mes vifs remerciements vont à ma promotrice Madame MOHELLEBI F, d'avoir accepté de diriger mon travail, par ses conseils et son soutien tout au long de notre travail.

Mes vifs remerciements vont également à Madame MANSOURI L, pour sa disponibilité, son soutien et ses conseils tout au long de notre travail.

Je remercie également les ingénieurs de laboratoire SDM de département de génie mécanique, et laboratoire Procédés et environnement (Boumerdes)

Je remercie les membres de la société AZEFFOUN MARINE

Mes remerciements vont également à tous ceux et celles de près ou de loin, m'ont porté aide et encouragement.

# *Dédicaces*

## **Je dédie ce travail**

A mes chers parents qui m'ont toujours soutenu tout au

Long de mes études

A ma chère sœur Louisa

A mon chère frère Mohammed

A toutes les personnes que j'aime ;

A tout mes amis et mes collègues

## Sommaire

<b>Introduction générale.....</b>	<b>01</b>
-----------------------------------	-----------

### **Chapitre I : généralité sur les matériaux composites**

Introduction .....	03
I.1 Définition d'un matériau composite .....	03
I.2 Intérêt des matériaux composites .....	04
I.3 Différents types de matériaux composites .....	04
I.3.1 Matériaux composites de grande diffusion .....	04
I.3.2 Matériaux composites de hautes performances .....	04
I.4 Classification des matériaux composites .....	05
I.4.1. Classification des matériaux composites suivant la forme des constituants .....	05
I.4.1.1 composite à particules .....	05
I.4.1.2 composites à fibres .....	05
I.4.2 Classification des matériaux composites suivant la nature des constituants .....	05
I.5 Constituants des Matériaux Composites .....	06
I.5.1 Les renforts .....	06
I.5.1.1 Différents types de renfort .....	06
I.5.1.2 Différentes natures de renfort .....	07
I.5.2 Les charges et les additifs .....	09
I.5.2.1 Les charge .....	09
I.5.3 La matrice .....	10
I.5.3.1 Les différents types de matrices .....	10
I.5.3.1.1 Les matrices organiques .....	10
I.5.3.1.2 Les matrices carbonées .....	12
I.5.3.1.3 Les matrices métalliques .....	13
I.5.3.1.4 Les matrices céramiques .....	13
I.6 la mise en œuvre des matériaux composites .....	14
I.6.1 Moulage au contact .....	14
I.6.2 Moulage par projection simultanée .....	14

I.6.3 Injection thermodurcissable BMC (Bulk Molding Compound) .....	15
I.6.4 Compression thermodurcissable SMC (Sheet Molding Compound) .....	16
I.6.5 Enroulement filamentaire (ou bobinage) .....	16
I.7 Architecture du composite .....	17
I.7.1 Les monocouches .....	17
I.7.2 les Sandwichs .....	18
I.7.3 Les stratifiées .....	19
I.8 Caractéristiques des matériaux composites.....	20
I.9 Domaines d'application .....	21
I.10 Les matériaux composites dans la construction navale .....	21
I.10.1 Généralités sur la construction navale .....	21
I.10.2 Activités de la construction navale .....	21
I.10.3 Les matériaux de construction d'un navire .....	22
Conclusion .....	26

## **Chapitre II : Comportement mécanique des stratifiés**

II.1 Stratifié .....	27
II.2 Types des stratifiés .....	27
II.2.1 Pli unidirectionnel (monocouche) .....	33
II.2.2 Calculs d'un pli cas unidirectionnel .....	34
II.3 Code de représentation d'un stratifié.....	43
II.4 Détermination des caractéristiques pour un pli unidirectionnel .....	45
II.4.1 Essai de traction longitudinale.....	45
II.4.2 Essai de traction transversale.....	46
II.4.3 Essai de traction hors axes .....	47
II.5 Essai de cisaillement inter – laminaire .....	48
II.6 Les mécanismes d'endommagement .....	48
II.6.1 Les mécanismes de rupture des stratifiés composites à renforts de fibres longues .....	48
II.6.1.1. Rupture intralaminare .....	49
II.6.1.2. Rupture interlaminare .....	50
II.6.1.3. Rupture translaminare.....	50
II.6.1.3.1. Rupture translaminare en traction.....	50
II.6.1.3.2. Rupture translaminare en compression.....	51

II.6.2. Les mécanismes d'endommagement dans les stratifiés composites .....	51
II.6.3. Développement des mécanismes et processus de rupture .....	51

### **Chapitre III : Techniques expérimentales**

Introduction .....	53
III.1 Matériaux et Matériels Utilisés .....	53
III.1.1. Matériaux .....	53
III.1.1.2. Le matériels .....	55
III.1.1.3 Etapes suivi pour l'élaboration du matériau à étudié .....	56
III.2. Techniques de caractérisation .....	57
III.2.1Caractérisation physico-chimique .....	58
III.2.1.1 Infra rouge .....	58
III.2.2.2. Observation à la microscopie optique .....	58
IV.2.2 caractérisation mécanique .....	59
IV.2.2.1 Essai de flexion à trois points .....	59
III.2.2.2 La micro dureté .....	62

### **Chapitre IV : Résultats et discussion**

Introduction .....	63
IV.1. Résultats et discussions .....	63
IV.1.1 Présentation des résultats des essais de flexion des matériaux composites .....	63
IV.1.1. 1.Composites UD en une couche .....	63
IV.2.1. 2.Composites UD en deux couches.....	66
IV.2.1. 3.Composites UD en trois couches .....	70
IV.2.1. 3.Résine seule.....	71
IV.1.2.Discussions.....	72
IV.1.2.1.Anisotropie.....	72
IV.1.2.2. 2.Selon l'angle de coupe .....	74
IV.1.2.2. 4.Influence du renforcement des UD .....	77
IV.1.2. Présentation des résultats d'infrarouge des matériaux composites non traités .....	78
IV.1.2.1.Résultats d'infrarouge .....	78
<b>Conclusion générale .....</b>	<b>80</b>

### **Refrènes bibliographiques**

## Liste des figures

<b>Figure I.1</b> Schéma illustratif d'un matériau composite .....	03
<b>Figure I.2</b> les différentes formes des renforts fibres de verre.....	07
<b>Figure I.3</b> principaux matériaux de renforts.....	07
<b>Figure I.4</b> Différentes familles de matrice .....	13
<b>Figure I.5</b> Procédé de moulage par contact .....	14
<b>Figure I.6</b> Moulage par projection simultanée .....	15
<b>Figure I.7</b> Injection thermodurcissable BMC [7].....	15
<b>Figure I.8</b> Compression thermodurcissable SMC [7] .....	16
<b>Figure I.9</b> Enroulement filamentaire (ou bobinage).....	17
<b>Figure I.10</b> Pli a renforcement unidirectionnel .....	18
<b>Figure I.11</b> Constitution d'un sandwich.....	19
<b>Figure I.12</b> composite stratifié .....	20
<b>Figure I.13</b> Construction des navires en bois .....	23
<b>Figure I.14</b> Construction des navires en acier .....	24
<b>Figure I.15</b> Construction des navires en aluminium .....	24
<b>Figure I.16</b> Construction des navires en matériaux composites.....	25
<b>Figure II.1</b> Structure d'un stratifié [11].....	27
<b>Figure II.2</b> Stratifié croisé [12] .....	29
<b>Figure II.3</b> Stratifié croisés symétriques [12].....	29
<b>Figure II.4</b> Stratifié croisés antisymétriques [12].....	30
<b>Figure II.5</b> Stratifiés équilibrés [12].....	31
<b>Figure II.6</b> Stratifié alterné [12] .....	31
<b>Figure II.7</b> Stratifié quasi-isotrope [12] .....	32
<b>Figure II.8</b> plis à renforcement unidirectionnel [14].....	33
<b>Figure II.9</b> Représentation d'un renfort unidirectionnel [11] .....	33
<b>Figure II.10</b> Structure d'un matériau composite unidirectionnel [15].....	34
<b>Figure II.11</b> Essai de traction longitudinale [15] .....	37
<b>Figure II.12</b> Orientation de stratifié dans le plan moyen [18].....	44
<b>Figure II.13</b> Traction longitudinale [17] .....	46
<b>Figure II.14</b> Traction transversale [17] .....	46
<b>Figure II.15</b> Traction hors axes [17] .....	47

<b>Figure.II.16</b> Ruptures par flexion de différentes séquences d'empilement	
a) Quasi-isotrope, b) Unidirectionnel, c) $\pm 45$ , d) 0/90 .....	49
<b>Figure.II.17</b> Evolution de la fissuration transverse .....	50
<b>Figure. II.18</b> Mécanismes d'endommagement dans les stratifiés.....	52
<b>Figure.III.1</b> Résine à l'état liquide.....	<b>53</b>
<b>Figure.III.2</b> La résine utiliser .....	53
<b>Figure.III.3</b> Forme de fibres de verre utilisées fibre de 800 .....	54
<b>Figure.III.4</b> La cire utilisée lors du moulage .....	55
<b>Figure.III.5</b> Le rouleau utilisé pour étaler la résine .....	56
<b>Figure.III.6</b> L'étuve MEMMERT .....	57
<b>Figure.III.7</b> Machine d'analyse infrarouge .....	58
<b>Figure.III.8</b> Schéma d'un microscope optique monoculaire.....	59
<b>Figure.III.9</b> Machine de flexion trois points .....	60
<b>Figure.III.10</b> Eprouvettes de flexion.....	61
<b>Figure.III. 11</b> Micro duromètre.....	62
<b>Figure.IV.1</b> Courbes forces/flèche d'une seule couche UD 0° .....	64
<b>Figure.IV.2</b> Courbes forces/flèche d'une seule couche UD 30° .....	64
<b>Figure.IV.3</b> Courbes forces/flèche d'une seule couche UD 45° .....	64
<b>Figure. IV.4</b> Courbes forces/flèche d'une seule couche UD 60° .....	65
<b>Figure. IV.5</b> Courbes forces/flèche d'une seule couche UD 90° .....	66
<b>Figure. IV.6</b> Courbes forces/flèche de deux couches UD 0° .....	67
<b>Figure. IV.7</b> Courbes forces/flèche de deux couches UD 30.....	68
<b>Figure. IV.8</b> Courbes forces/flèche de deux couches UD 45° .....	69
<b>Figure. IV.9</b> Courbes forces/flèche de deux couches UD 0° .....	69
<b>Figure.IV.10</b> Courbes forces/flèche de deux couches UD 90° .....	70
<b>Figure. IV.11</b> Courbes forces/flèche de trois couches UD 0° .....	70
<b>Figure. IV.12</b> Courbes forces/flèche de trois couches UD 90° .....	71
<b>Figure. IV.13</b> Courbes forces/flèche de résine seule.....	72
<b>Figure.IV.14.</b> Présentation comparative des propriétés mécanique du composite constitué d'une couche en UD.....	73
<b>Figure.IV.15.</b> Présentation comparative des propriétés mécanique du composite constitué de deux couches en UD .....	73
<b>Figure.IV.16.</b> Présentation comparative des propriétés mécanique du composite constitué de trois couches en UD .....	73

<b>Figure.IV.17.</b> Présentation de la variation des propriétés mécanique du composite constitué d'une couche en UD en fonction de l'angle de coupe.....	74
<b>Figure.IV.18.</b> Présentation de la variation des propriétés mécanique du composite constitué de deux couches en UD en fonction de l'angle de coupe.....	75
<b>Figure.IV.19.</b> La variation des propriétés mécanique de différents matériaux :a)-0°,b)-90°...	76
<b>Figure.IV.20.</b> Les Propriétés mécanique de différents matériaux.....	77
<b>Figure.IV.21</b> Spectre infrarouge d'échantillon résine seule.....	78
<b>Figure.IV.22</b> Spectre infrarouge d'échantillon matériau composite (Résine + fibre).....	78
<b>Figure.IV.23</b> Spectre infrarouge d'échantillons résine seule et matériau composite assemblés.....	78

## Liste des tableaux

<b>Tableau I.1 : quelques compositions de verre E, D et R.....</b>	<b>08</b>
<b>Tableau II .1 : comparaison de différents composites .....</b>	<b>48</b>
<b>Tableaux.IV.1 : Caractéristiques des éprouvettes constituées d'une couche UD selon 0° ...</b>	<b>64</b>
<b>Tableaux.IV.2 : Caractéristiques des éprouvettes constituées d'une couche UDselon 30°...</b>	<b>64</b>
<b>Tableaux. IV.3 : Caractéristiques des éprouvettes constituées d'une couche UDselon 45° ..</b>	<b>65</b>
<b>Tableaux. IV.4 : Caractéristiques des éprouvettes constituées d'une couche UDselon 60° ..</b>	<b>65</b>
<b>Tableaux. IV.5 : Caractéristiques des éprouvettes constituées d'une couche UDselon 90° ..</b>	<b>65</b>
<b>Tableaux. IV.6 : Caractéristiques des éprouvettes constituées de deux couches UD selon 0° .....</b>	<b>66</b>
<b>Tableaux. IV.7 : Caractéristiques des éprouvettes constituées de deux couches UD selon 30° .....</b>	<b>67</b>
<b>Tableaux. IV.8 : Caractéristiques des éprouvettes constituées de deux couches UD selon 45° .....</b>	<b>68</b>
<b>Tableaux. IV.9 : Caractéristiques des éprouvettes constituées de deux couches UD selon 60° .....</b>	<b>69</b>
<b>Tableaux. IV.10 : Caractéristiques des éprouvettes constituées de deux couches UD selon 90° .....</b>	<b>69</b>
<b>Tableaux IV.11 : Caractéristiques des éprouvettes constituées de trois couches UD selon 0° .....</b>	<b>70</b>
<b>Tableaux. IV.12 : Caractéristiques des éprouvettes constituées de trois couches UD selon 90° .....</b>	<b>71</b>
<b>Tableaux. IV.13 : Caractéristiques des éprouvettes en résine seule .....</b>	<b>71</b>
<b>Tableaux.IV.14 : Caractéristiques des composites UD .....</b>	<b>74</b>



# **Introduction générale**

## Introduction générale

---

Depuis des années, les matériaux composites se sont imposés dans de nombreux domaines d'application et leur diffusion augmente à travers le monde. Une telle évolution d'utilisation n'est pas un hasard mais bien, la réponse à des besoins technologiques de plus en plus sévères. L'avantage des matériaux composites est en effet de pouvoir façonner à volonté plusieurs caractéristiques mécaniques au besoin d'allègement dans un même matériau, qui par la suite doit s'adapter aux solutions technologiques des problèmes à résoudre. Les constituants du composite sont généralement choisis en fonction de l'application que l'on souhaite en faire par la suite. Les critères de choix peuvent être, par exemple, les propriétés mécaniques requises, la résistance..., etc.

Les structures composites stratifiées sont largement utilisées dans l'aérospatiale, l'automobile, la marine, les applications civiles et d'autres techniques en raison de caractéristiques avantageuses telles que les ratios élevés de rigidité et de résistance au poids et au faible coût d'entretien. Ils sont constitués de couches de fibres noyées dans une matrice. Chaque couche est appelée une strate ou pli. Les couches du matériau à renfort fibreux sont empilées avec des directions des fibres de chaque couche généralement orientées de manière différentes afin de donner des résistances et des rigidités dans différentes directions. Ainsi, les résistances et les rigidités du composite stratifié à renforts fibreux peuvent être adaptés aux exigences spécifiques de conception et de construction des éléments d'une structure.

Dans ce travail, nous nous intéressons à l'étude de l'influence de divers paramètres: les différentes orientations de fibres unidirectionnelles et le nombre des plis sur le comportement mécanique. En premier lieu, à titre de référence, nous avons mené des essais sur des unidirectionnels UD ( $0^\circ$ ). Par la suite des essais sont effectués sur des éprouvettes découpées avec des angles différents ( $30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ ) par rapport à la direction du renfort sont des essais de flexion hors-axes. Nous analysons l'ensemble des résultats de différents stratifiés sollicités en flexion trois points afin d'évaluer leur comportement et l'identification l'agencement le plus adéquat pour une telle sollicitation. Nous avons aussi effectué des analyses IRTF pour nos échantillons afin de chercher l'influence de l'ajout du renfort fibre de verre sur le spectre de la résine polyester seule.

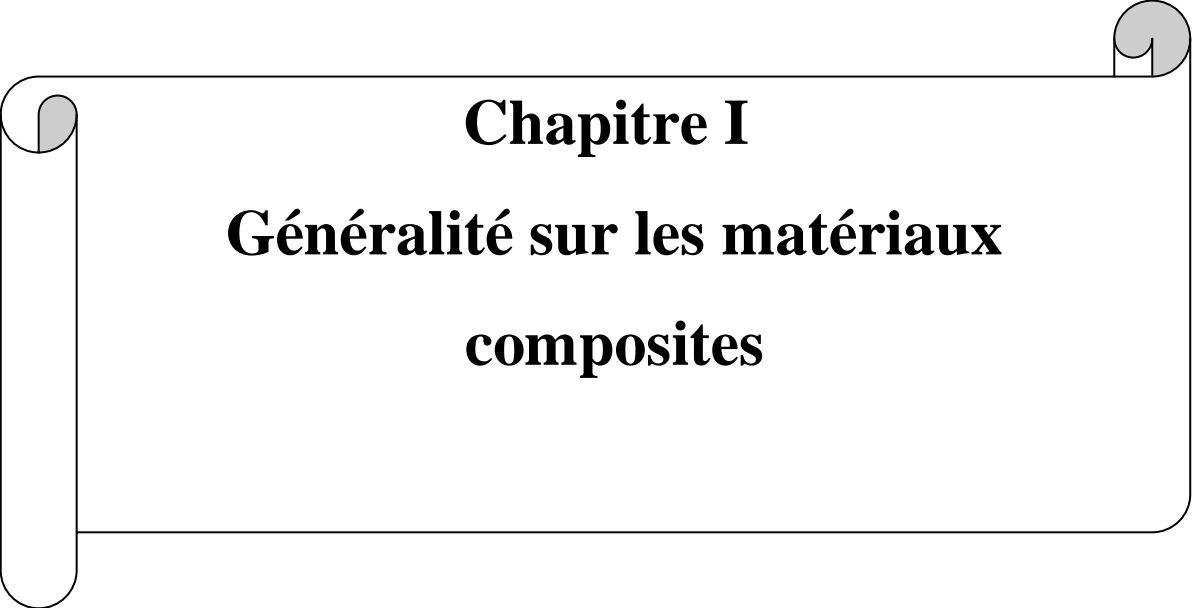
## Introduction générale

---

Notre mémoire est scindé en deux parties, une partie théorique constituée de deux chapitres ; le premier est consacré à une présentation générale des matériaux composites ainsi que leur domaine d'utilisation et leurs classifications. De plus les différentes constitutions de composites ont été exposées, telles que, les matrices, les différents types de renforts et les diverses structures.

Le second chapitre, porte sur le comportement des stratifiés et les mécanismes d'endommagement afin d'avoir une bonne compréhension de leurs caractéristiques structurales et définir les différents mécanismes d'endommagement ; Puisque les matériaux composites stratifiés se composent de deux matériaux ou plus, ils posent beaucoup de problèmes au niveau des interfaces notamment le délaminage et la propagation des fissures entre les couches.

La seconde partie divisée en deux chapitres, le premier concerne l'étude expérimentale, dans laquelle nous exposons les techniques expérimentales utilisées et élaboration de nos stratifiés. Dans le quatrième chapitre nous présentons les résultats et les discussions. Nous terminons ce travail par une conclusion générale.



**Chapitre I**  
**Généralité sur les matériaux**  
**composites**

## Introduction

Le développement de nouveaux matériaux est soumis aux besoins des utilisateurs (constructeurs). Ceux-ci veulent toujours des matériaux plus performants, plus économiques et qui durent plus longtemps. Les chercheurs sont le plus souvent amenés à optimiser les solutions déjà utilisées, mais dans certains cas, ils doivent complètement repenser le problème et envisager de " nouveaux matériaux ". En effet, on ne découvre plus de nouveaux matériaux, mais on crée plutôt des nouvelles associations de matériaux. L'un des résultats de cette association est l'aboutissement à un matériau composite, qui fait le sujet de notre étude.

### I.1 Définition d'un matériau composite

Un matériau composite est constitué de l'assemblage de deux ou plusieurs matériaux de natures différentes. Leur association est complémentaire et permet d'aboutir à un matériau dont les performances recherchées seront supérieures à celles des composants pris séparément. Un matériau composite est constitué dans le cas le plus général d'une ou plusieurs phases discontinues réparties dans une phase continue. La phase discontinue, appelée renfort ou matériau renforçant, est habituellement plus dure avec des propriétés mécaniques supérieures à celles de la phase continue, appelée matrice [1].

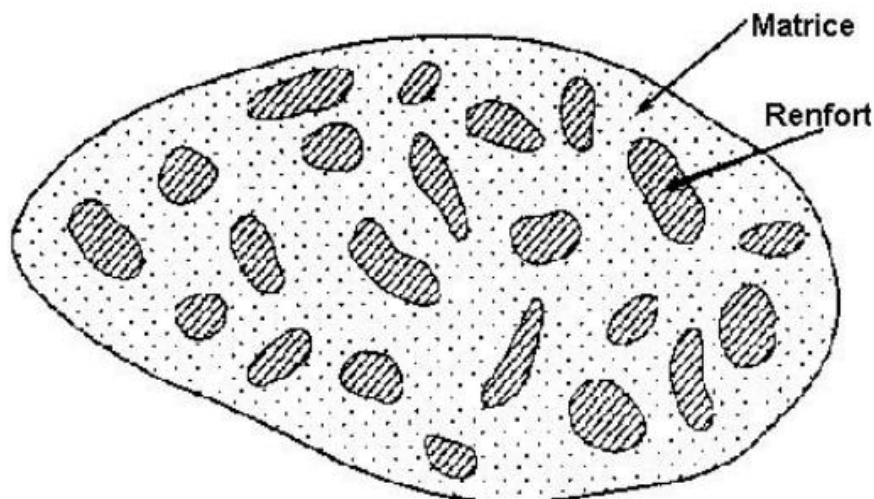


Figure.I.1 Schéma illustratif d'un matériau composite [1]

## **I.2 Intérêt des matériaux composites**

L'utilisation des matériaux composites est générée par leurs principales caractéristiques :

- l'allégement des structures,
- Une bonne tenue en fatigue,
- Une résistance à la corrosion,
- L'insensibilité aux produits chimiques couramment utilisés dans la mécanique.
- Une meilleure tenue au feu,

Par contre, les matériaux composites vieillissent sous l'action des agents extérieurs tels que l'humidité et la chaleur, et ont une tenue moyenne aux chocs et aux impacts [2].

## **I.3 Différents types de matériaux composites**

On distingue deux types de composites : les composites de grande diffusion et les composites hautes performances [2].

### **I.3.1 Matériaux composites de grande diffusion**

Les matériaux composites à grande diffusion offrent des avantages essentiels, qui sont : optimisation des coûts par diminution des prix de revient, leur composition de polyester avec des fibres de verre longues ou courtes (sous forme de mat ou tissu) et la simplicité du principe d'élaboration du matériau (moulage par contact, SMC et injection).

### **I.3.2 Matériaux composites de hautes performances**

Les matériaux composites à hautes performances sont utilisés dans le domaine d'aéronautique où le besoin d'une grande performance est dû à des hautes valeurs ajoutées.

Les renforts sont plutôt des fibres longues. Les taux de renfort sont supérieurs à 50%.

Ces composites sont élaborés par les procédures suivantes :

- Drapage autoclave, enroulement filamentaire.
- Beaucoup de procédés encore manuels.

## **I.4 Classification des matériaux composites**

Le classement des matériaux composites est fait suivant la forme et la nature des constituants [3].

### **I.4.1 Classification des matériaux composites suivant la forme des constituants**

#### **I.4.1.1 Composite à particules**

Le renfort se trouve sous forme de particules.

#### **I.4.1.2 composites à fibres**

Le renfort se trouve sous forme de fibres, qui à leurs tours se divisent en :

➤ **Composites à fibres longues**

Représentés par un ensemble de fibres continues alignées et immergées dans une matrice qui assure leur cohésion.

➤ **Composites à fibres courtes**

Le renfort se trouve sous forme de fibres discontinues disposées de façon aléatoire non orientée.

➤ **Composites à renfort tissu**

Un tissu est constitué de fils tissés dans deux directions perpendiculaires, qui sont la direction de chaîne (associée à la direction longitudinale de la couche composite) et la direction de trame (associée à la direction transversale de la couche composite). Les tissus diffèrent par le type de fils utilisés et par le mode d'entrecroisement des fils de chaîne et de trame.

### **I.4.2 Classification des matériaux composites suivant la nature des constituants**

En se référant à la matrice, on trouve des matériaux composites à :

- Matrice organique.
- Matrice métallique.
- Matrice de carbone.
- Matrice céramique.

## **I.5 Constituants des Matériaux Composites**

### **I.5.1 Les renforts**

Les renforts contribuent à améliorer la résistance mécanique à la traction et la rigidité des matériaux composites et se présentent sous forme filamentaire (des fibres organiques ou inorganiques) [1].

#### **I.5.1.1 Différents types de renfort [1]**

Les renforts les plus utilisés se présentent sous forme de fibres ou formes dérivées et constituent une fraction volumique de matériau composite généralement comprise entre 0.3 et 0.7.

Les renforts fibres se présentent sous diverses formes commerciales.

- Sous forme de roving (fils, mèches, etc. ....) le roving est un assemblage de fils de bases parallèles groupés sans torsion.
- Sous forme de tissus (tissus taffetas, toiles, serge, etc....) le tissu est formé par l'entrecroisement perpendiculaire des roving.

Les tissus de roving peuvent peser jusqu'à 800 g/m<sup>2</sup>.

- Sous forme de mat (à fil coupé, à fil continu): le mat est un matelas de fils coupés ou continu à ensimage plastique, agglomérés par un liant à solubilité rapide ou lente dans la résine [1].

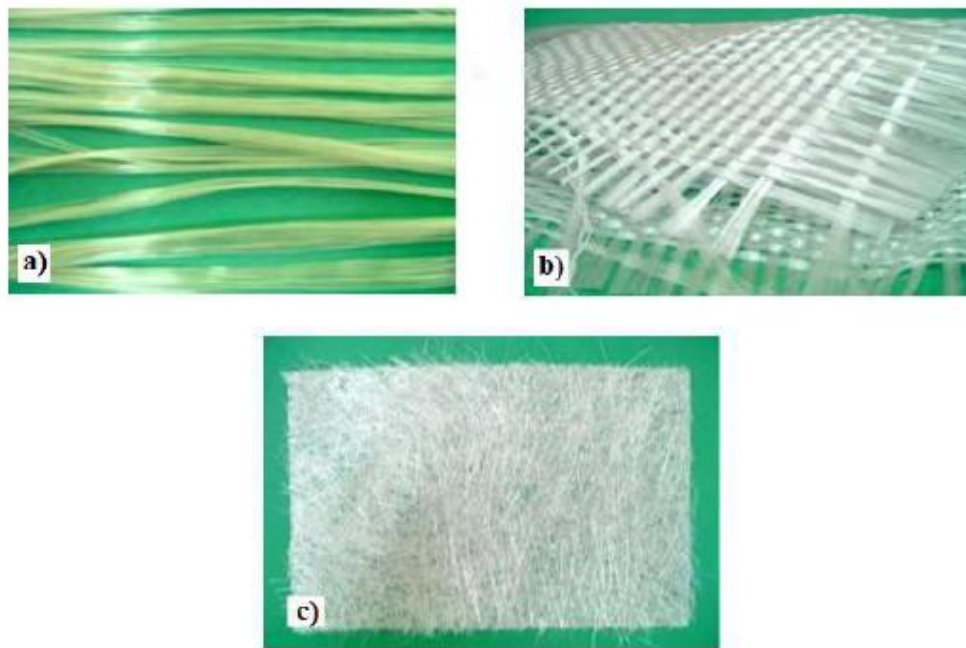


Figure I.2 les différentes formes des renforts fibres de verre

a) Roving de verre b) Tissu de verre c) Mat de verre

I.5.1.2 Différentes natures de renfort :

Les renforts peuvent être de nature différente, comme illustré sur la figure (I.3) qui récapitule les diverses origines des matériaux constituant les renforts.

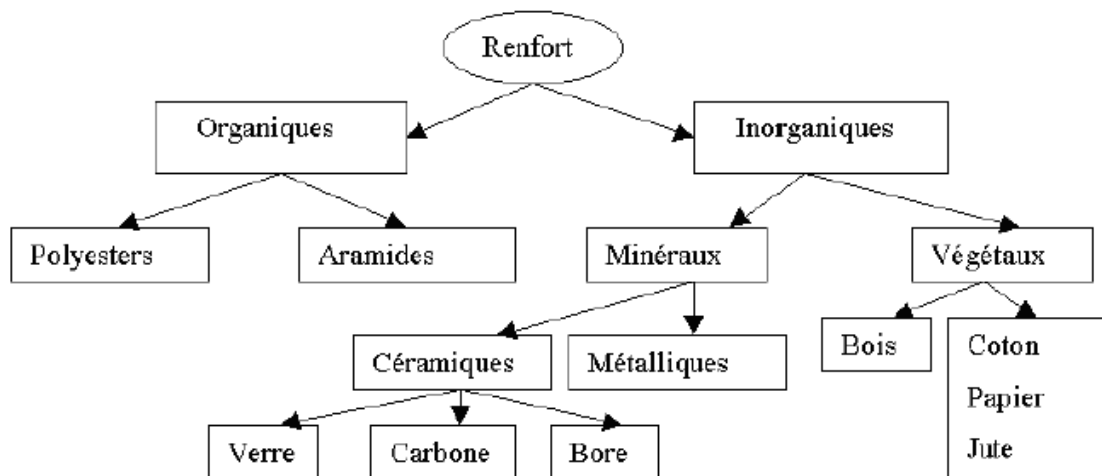


Figure I.3 : principaux matériaux de renforts

La forme la plus utilisée pour les renforts est la forme fibreuse dont les fibres de verre et de Carbone, grâce à leurs propriétés, ont connues une très grande exploitation dans l'industrie.

➤ **Les fibres de verre**

Les fibres de verre constituent le renfort le plus utilisé actuellement pour les Composites (dans plus de 95%). Elles offrent pour un prix raisonnable une bonne adhérence, de bonnes propriétés mécaniques (mais inférieures à celles de la fibre carbone) et des propriétés d'isolation électrique acceptables pour la plupart des applications. Cependant, leurs faibles modules d'élasticité (et leurs densités qui sont supérieure à celle des fibres de carbone) limitent leurs utilisations pour la fabrication des pièces structurales (en aéronautique par exemple).

Les fibres de verre sont obtenues à partir de l'oxyde minéral (Silice, Alumine, Chaux, Magnésie, oxyde de bore, ...). On distingue plusieurs types :

- **Verre E** : à usage général avec de bonnes propriétés électriques.
- **Verre D** : il a de bonnes propriétés diélectriques pour l'utilisation en électronique (circuit imprimé).
- **Verre C** : il a une bonne résistance chimique, pour les couches superficielles des structures sur le plan chimique.
- **Verre R et S** : ont une haut résistance mécanique pour la réalisation des pièces structurales. Les fibres de verre **E** sont les plus utilisés, le tableau suivant représente quelque composition de verre E, D et R[1].

**Tableau I.1 : quelques compositions de verre E, D et R**

Constituants		Composition en masse %		
		E	D	R
Silice	SiO <sub>2</sub>	53 – 54	73 – 74	60
Alumine	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14 – 15,5	-	25
Chaux	CaO	20 – 24	0,5 – 0,6	9
Magnésie	Mg	20 – 24	0,5 – 0,6	6
Oxyde de bore	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,5 - 9	22 – 23	-
Fluor	F	0 – 0,7		
Oxyde de fer	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	< 1	0,1- 0,2	-
Oxyde de titane	TiO <sub>2</sub>	< 1	0,1- 0,2	
Oxyde de sodium	Na <sub>2</sub> O	< 1	1,3	
Oxyde de potassium	K <sub>2</sub> O	< 1	1,5	

➤ **Les autres fibres**

Les autres fibres sont peu utilisées par ce que leurs caractéristiques sont moins performantes par rapport aux deux premières. On peut citer :

➤ **Les fibres d'aramide**

Elles sont généralement connues sous le nom de *Kevlar*. Elles ont une bonne résistance aux chocs, à l'impact et à l'abrasion, mais leur utilisation est limitée par leur faible résistance à la compression, à la flexion, au flambement, et elles sont sensibles au cisaillement inter laminaire (l'adhérence entre matrice et fibre est mauvaise ou moyenne).

➤ **Fibres naturelles**

Comme le chanvre et le lin, ces fibres ont de bonnes propriétés mécaniques (module de Young peu atteindre celui du verre) pour un prix modeste, elles sont particulièrement écologiques puisque ce sont des produits naturels ; mais ces fibres, présentent plusieurs verrous techniques : elles ne sont pas fabriquées par un processus industriel, la quantité et la qualité des fibres produites dépendent de l'environnement, les fibres naturelles sont difficilement calibrables et plus difficilement manipulables.

## **I.5.2 Les charges et les additifs**

### **I.5.2.1 Les charges**

On désigne sous le nom général de charge toute substance inerte, minérale ou végétale qui est ajoutée à un polymère de base, permet de modifier de manière sensible les propriétés mécaniques, électriques ou thermiques, d'améliorer l'aspect de surface ou bien, simplement, de réduire le prix de revient du matériau transformé.

A l'inverse des matières thermoplastiques, les matières thermodurcissables ont toujours contenu des charges de nature et de forme variées, à des taux souvent élevés pouvant atteindre 60 % en masse, dépassant ce pourcentage le composite arrive à saturation.

Pour un matériau donné, le choix d'une charge est déterminé en fonction des modifications recherchées pour l'objet fini. Mais, d'une manière générale, les substances utilisables comme charges des matières plastiques devront d'abord satisfaire à un certain nombre d'exigences :

Compatibilité avec la résine de base ;

- Mouillabilité ;
- Uniformité de qualité et de granulométrie ;

- Faible action abrasive ;
- Bas prix de revient [4].

### **I.5.2.2 Les additifs**

Un additif désigne une substance qui est introduite dans un mélange pour apporter une propriété spécifique, ils se trouvent en faible quantité (quelque % et moins) et interviennent comme :

- Adjuvants ;
- Lubrifiants et agents de démoulage ;
- Pigments et colorants ;
- Agents anti-retrait ;
- Agents anti-ultraviolets.

### **I.5.3 La matrice [5]**

La matrice est constituée de résine mélangée, pour améliorer ses caractéristiques, à une charge qui facilite aussi la mise en œuvre et diminue le coût de la production. Le mélange est considéré mécaniquement comme une phase homogène, et nous obtenons ainsi un matériau composite formé d'un renfort et d'une matrice.

Le rôle de la matrice est d'assurer le lien entre les fibres et de transmettre les sollicitations. Elle assure la résistance du matériau dans le sens transverse du renfort, ainsi qu'une protection physico-chimique des fibres contre les agents nocifs de l'environnement. De plus elle conditionne directement la tenue thermique, et la résistance à la compression et au cisaillement inter-laminaire.

Les résines utilisées doivent être assez déformables et doivent présenter une bonne compatibilité avec les fibres. Elles doivent également avoir une masse volumique faible de manière à conserver au matériau composite des caractéristiques mécaniques spécifiques élevées [5].

### **I.5.3.1 Les différents types de matrices**

#### **I.5.3.1.1 Les matrices organiques**

La matrice organique est la partie polymère du système qui se divise en deux familles principales thermoplastiques et thermodurcissables.

Il est important de bien situer les différences fondamentales de ces deux types de matrices.

- La structure des TP se présente sous forme de chaînes linéaires, il faut les chauffer pour les mettre en forme (les chaînes se plient alors), et les refroidir pour les fixer (les chaînes se bloquent). Cette opération est réversible.
- La structure des TD a la forme d'un réseau tridimensionnel qui se ponte (double liaison de polymérisation) pour durcir en forme de façon définitive, lors d'un échauffement. La transformation est donc irréversible.

#### **a) Les résines thermodurcissables**

Les résines TD sont exceptionnellement utilisées sans renforts, leurs caractéristiques intrinsèques ne le permettent pas. Elles ne peuvent être mises en forme qu'une seule fois.

Après la polymérisation par rapport à la chaleur en présence d'un catalyseur, elles conduisent à une structure géométrique qui ne peut pas être détruite que par un apport important d'énergie thermique.

Il existe plusieurs familles de résines TD, on peut citer :

- **Polyesters insaturés:** C'est la résine la plus utilisée dans l'application composite de grande distribution.

Une résine de polyester insaturé contenant un monomère (généralement le styrène) est réticulée à température ambiante par addition d'un catalyseur de type peroxyde organique et d'un accélérateur.

Elle passe successivement de l'état liquide visqueux initial à l'état de gel, puis à l'état de solide infusible. La réaction est exothermique et la température de la résine augmente progressivement depuis le gel jusqu'à un maximum pour redescendre ensuite lentement à la température ambiante.

La réaction de durcissement dépend de la réactivité de la résine, de la forme de l'objet fabriqué (épaisseur, etc.), de la nature et du dosage du système catalytique [2].

#### **b) Les résines thermoplastiques**

Polymères linéaires ou ramifiés, qui peuvent être ramollis par chauffage et durcis par refroidissement plusieurs fois, elles sont fréquemment utilisées seules (sans renfort et sans charge), dans ce cas on ne peut plus les considérer comme matériaux composites, leurs propriétés intrinsèques sont suffisantes pour permettre la réalisation d'objets et de pièces à fonction diverses.

Les polymères utilisés sont essentiellement des thermoplastiques techniques qui présentent à l'état vierge de bonnes caractéristiques mécaniques. Un renforcement à l'aide de fibres courtes leur confère une tenue thermique et mécanique améliorée et une bonne stabilité dimensionnelle.

Les principales matrices TP utilisées (possédant toutes une tenue en température supérieure à 100 °C) sont les suivantes :

- **Polyamide (PA)** : tenue au choc, bonne résistance à la fatigue et aux hydrocarbures;
- **Poly téréphtalate éthylénique et butylénique (PET, PBT)** : bonne rigidité, bonne ténacité ;
- **Polycarbonate (PC)** : tenue au choc ;
- **Polysulfure de phénylène (PPS)** : résistance à l'hydrolyse ;
- **Polyoxyméthylène (POM)** : bonne tenue à la fatigue ;
- **Polysulfures (PSU et PPS)** : bonne stabilité chimique et à l'hydrolyse, peu de fluage, tenue au chaud ;
- **Polypropylène (PP)** : peu onéreux et assez stable en température, mais combustible.

Il existe aussi deux autres types de résines dont leur emploi est limité qui sont :

- Résines thermostables (tenue en température > 200 °C et bonnes propriétés mécaniques), comme :
  - Polyamide-imide (PAI) ;
  - Polyéther-imide (PEI) ;
  - Polyéther-sulfone (PES) ;
  - Polyéther-éther-cétone (PEEK).
  
- Les caoutchoucs et les élastomères, qui sont caractérisés par leur forte élasticité et un module de Yong très faible.

### **I.5.3.1.2 Les matrices carbonées**

Elles sont produites par le même principe que celui utilisé pour la production des fibres de carbone : carbonisation d'une matrice organique à haute température.

Elles sont constituées de grains de carbone pyrolytique qui se dépose à chaud sur les fibres, ce qui assure une liaison mécanique entre celle-ci et ferme les vides laissés entre elles. On

obtient ainsi un matériau composite dont la masse volumique se rapproche de celle du carbone massif.

### I.5.3.1.3 Les matrices métalliques

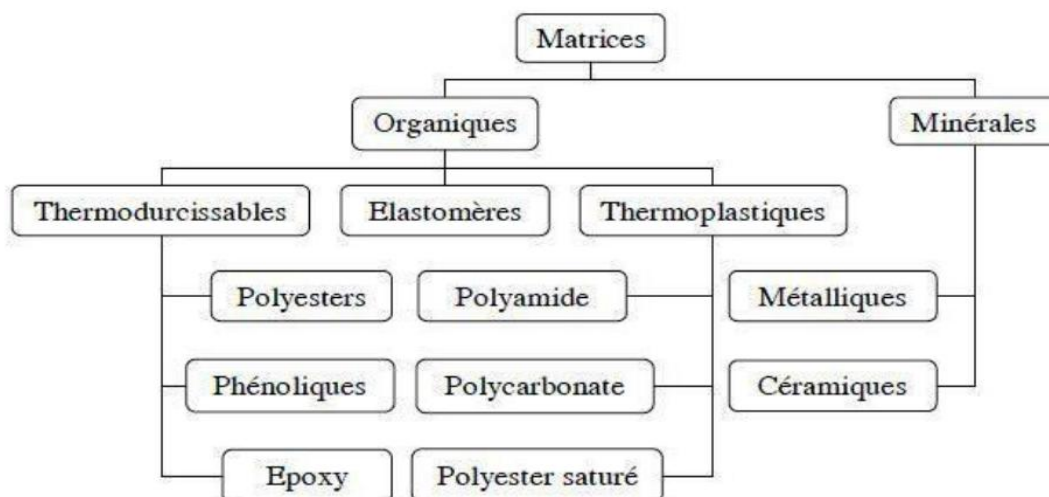
La température maximale d'utilisation des polymères étant peu élevée, et le carbone risque de s'oxyder à plus de 500°C, il faut donc parfois envisager d'utiliser des matrices dont l'inertie chimique est meilleure à plus haute température, certains métaux et alliages métalliques peuvent répondre à cette exigence, on a donc recours à des matrices métalliques dans certaines conditions :

- Des propriétés mécaniques supérieures,
- Résistance plus élevée à l'attaque de certains solvants,
- Tenue en température élevée,
- Comportement pas parfaitement élastique,
- Augmentation du poids du composite,

### I.5.3.1.4 Les matrices céramiques

Les propriétés intrinsèques des céramiques (réfractaire, rigidité, résistance et bonne stabilité chimique), leurs permet potentiellement de jouer le rôle de matrice dans des matériaux composites, dans ce cas le but des fibres de renfort est d'améliorer la ténacité de telles matrices, ainsi que leur résistance aux chocs thermiques.

Sur la **figure I.4** nous résumons l'essentiel de ces matrices



**Figure I.4** : Différentes familles de matrices

## I.6 La mise en œuvre des matériaux composites

Généralement le choix d'un procédé de moulage se fait en fonction de certains paramètres à savoir:

- Imprégnation du renfort par le système résineux.
- Mise en forme à la géométrie de la pièce.
- Durcissement du système soit :
- par polycondensation et réticulation pour les matrices thermodurcissables,
- par simple refroidissement pour les matières thermoplastiques.

Les procédés les plus importants sont :

- Moulage par contact

### I.6.1 Moulage par contact

Le principe consiste à disposer dans un moule les renforts (sous forme de mat ou de tissu) imprégnés manuellement d'une matrice thermodurcissable.

Les pièces de formes quelconques peuvent être réalisées avec une cadence très faible.

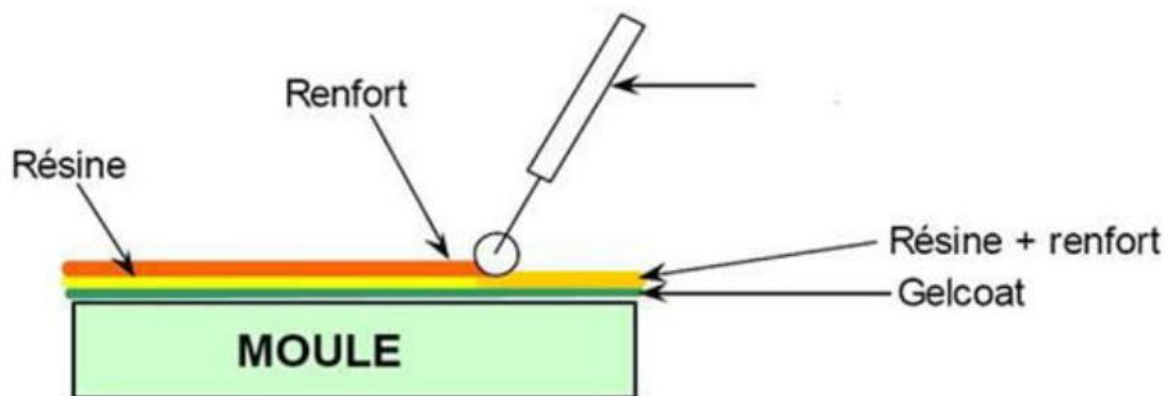


Figure I.5 : Procédé de moulage par contact

### I.6.2 Moulage par projection simultanée

Le moulage est effectué par projection simultanée de fibres coupées et résine catalysée sur un moule. L'équipement à projeter est constitué d'une machine à couper le stratifié et d'un pistolet projetant la résine et les fibres coupées, l'ensemble fonctionnant par air comprimé. La couche de fibres imprégnées de résine est ensuite compactée et éboulée au rouleau cannelé. Le

moulage par projection permet d'obtenir de grandes séries de pièces, avec un bas prix de revient [6].

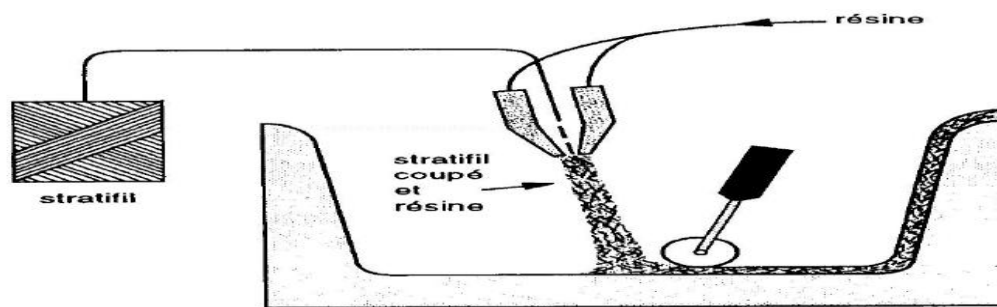


Figure I.6 : Moulage par projection simultanée

### I.6.3 Injection thermodurcissable BMC (Bulk Molding Compound)

Le moulage du compound est réalisé entre moule et contre moule chauffé à température entre 140 à 170°C sous une pression de 50 à 100 bars.

Les avantages : réalisation de grandes séries, peu de finition.

Le compound : c'est de la résine, de la fibre coupée et de la charge [7].

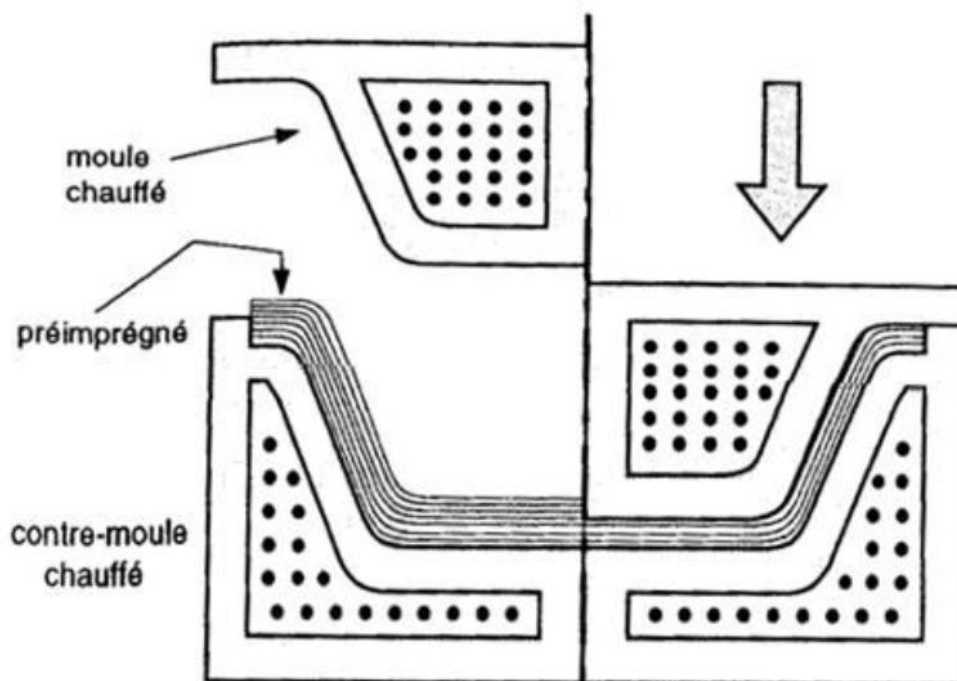


Figure I.7 : Injection thermodurcissable BMC [7]

### I.6.4 Compression thermodurcissable SMC (Sheet Molding Compound)

Le principe consiste à déposer des feuilles de pré imprégnés dans un contre moule chauffé, de comprimer le matériau avec un moule chauffé, polymérisation puis éjection de la pièce. Les avantages : coût matière, propriétés mécaniques et thermiques. Les limites sont l'aspect, le dimensionnement des presses et la finition [7].

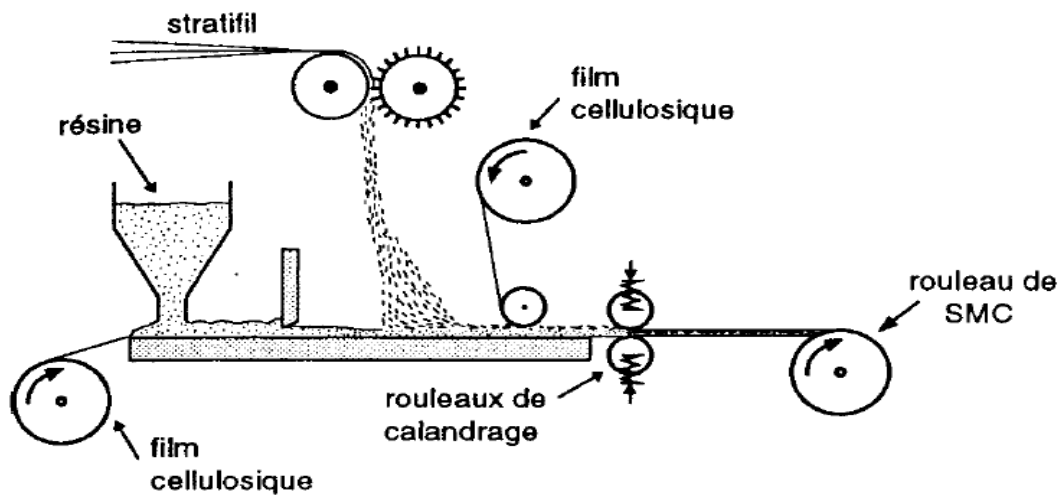


Figure I.8 : Compression thermodurcissable SMC [7]

### I.6.5 Enroulement filamentaire (ou bobinage)

Technologie pour les HP. Le principe consiste en un enroulement sous tension sur un mandrin tournant autour de son axe de fibres continues préalablement imprégnées d'un liant. Les avantages sont la disposition optimale des renforts, les très bonnes propriétés mécaniques, possibilité de réaliser des pièces de grandes dimensions avec des surfaces internes lisses [7].

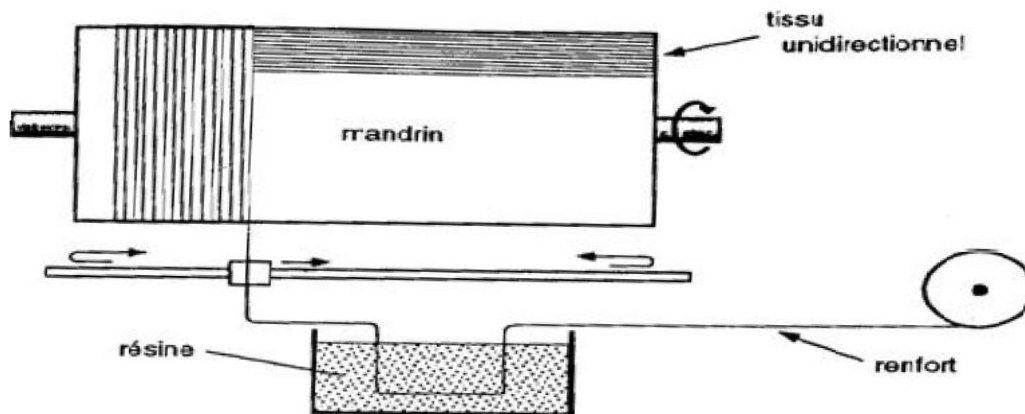


Figure I.9 : Enroulement filamentaire (ou bobinage)

Il existe d'autres procédés : pultrusion, drapage en autoclave, centrifugation, stratification en continu, thermoformage sous vide et estampage.

## I.7 Architecture du composite

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

Les monocouches ;

Les stratifiées ;

Les sandwiches [8].

### I.7.1 Les monocouches

Le composite monocouche (couche élémentaire ou strate) correspond à l'unité élémentaire d'épaisseur, elle est constituée d'un ou plusieurs plis identiques (tissé, UD, mats,...) assemblés sans aucune orientation. Un pli est un semi produit de composites (fibres+matrice) présenté sous forme quasi-bidimensionnelle, feuille d'épaisseur faible ( $\approx 0.125$  mm). On distingue, le pli UD (Le renfort est à structure UD), le pli tissé (Le renfort est à structure orienté) et le pli mat (Le renfort est à structure aléatoire).

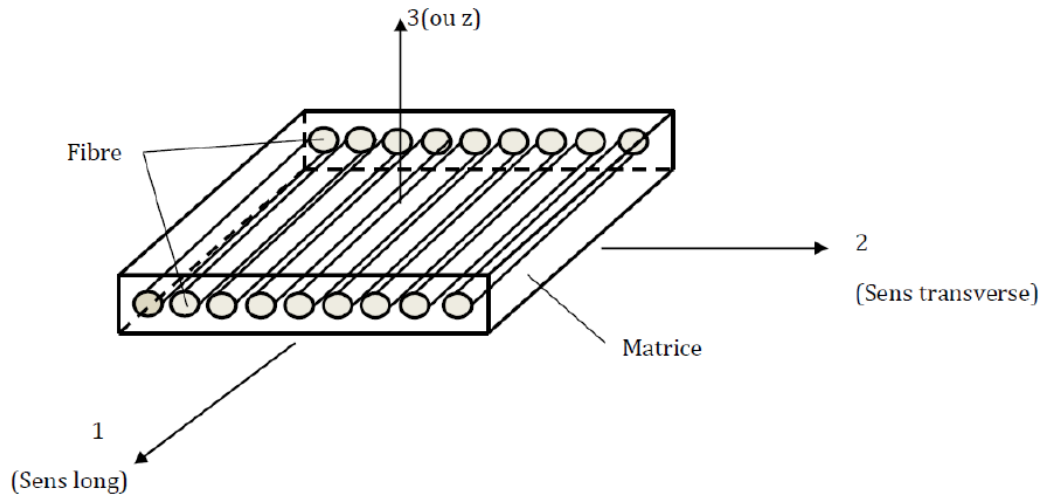


Figure I.10 : Pli à renforcement unidirectionnel

### I.7.2 les Sandwichs

Les matériaux sandwichs résultent généralement de l'association de deux semelles ou peaux de faible épaisseur, constituées de matériaux à haute résistance et haut module et d'une âme beaucoup plus épaisse et de faible densité. Ils ont pour avantages: une grande rigidité, une résistance à la rupture élevée associées à un faible poids par unité de surface. Malgré une activité de recherche et de développement sur ces matériaux, le comportement au cours de l'endommagement reste peu connu. Le matériau sandwich possède une grande légèreté en flexion et c'est un excellent isolant thermique (figure.I.11).

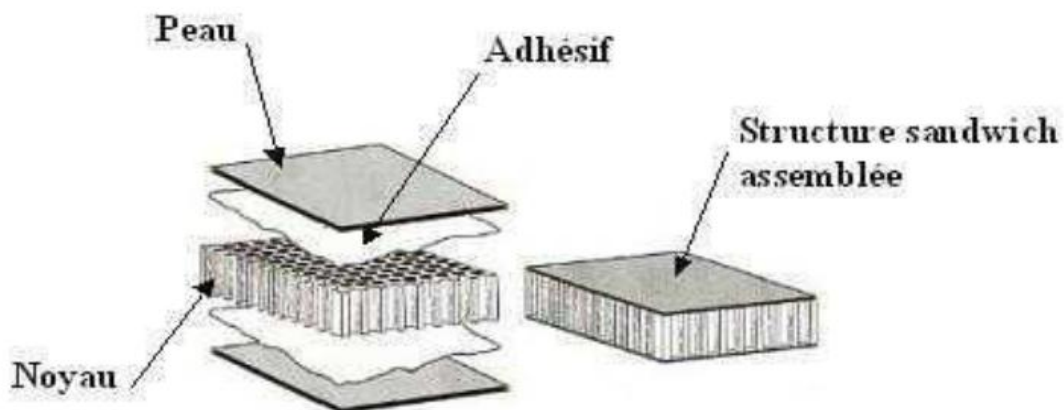
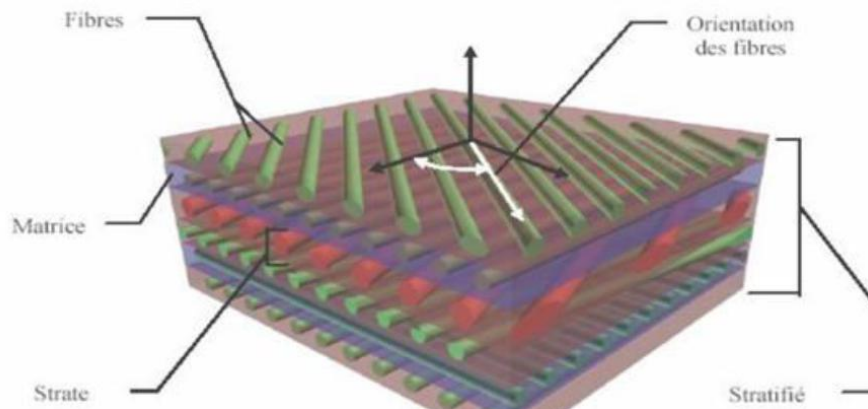


Figure I.11 Constitution d'un sandwich.

### I.7.3 Les stratifiées :

Le composite stratifié ou multicouche est un ensemble de couches empilées et orientées suivant un ordre de drapage défini et rendues solidaires par l'opération de polymérisation.

Le drapage c'est l'orientation des plis par rapport à un référentiel donné. Il définit les propriétés mécaniques, électromagnétiques et thermiques globales du matériau composite.



**Figure I.12** composite stratifié

Les stratifiés peuvent être de trois types :

- 1) **Equilibrés** : le stratifié contient autant de couches orientées suivant la direction  $+45^\circ$  que de couches suivant la direction  $-45^\circ$ ,
- 2) **symétriques** : les couches du stratifié sont disposées symétriquement par rapport à un plan moyen (miroir),
- 3) **orthogonaux** : le stratifié comporte autant de couches à  $0^\circ$  que de couches à  $90^\circ$ .

Lorsque la symétrie miroir est réalisée, elle entraîne la symétrie des contraintes et empêche ainsi l'apparition des déformations d'ensembles de la pièce (voilement, gauchissement).

L'avantage que présentent les composites stratifiés est de permettre de créer des matériaux aux propriétés mécaniques orientées de manière optimale afin de mieux répondre aux sollicitations de la structure.

## I.8 Caractéristiques des matériaux composites

Les propriétés des matériaux composites dépendent de beaucoup de facteurs et sont différentes selon les divers types de matériaux composites. Ces propriétés résultent :

- des propriétés, de la nature et de la quantité des matériaux constitutifs.
- des constituants, de la géométrie et de la distribution du renfort
- de leurs interactions, de la nature de l'interface matrice-renfort, etc.

Les principales caractéristiques des pièces fabriquées en matériaux composites sont :

- Faible masse,
- Bonne tenue en fatigue (durée de vie augmentée),
- Absence de corrosion,
- Absence de plasticité (leur limite élastique correspond à la limite de rupture)
- Vieillessement sous l'action de l'humidité et de la chaleur,
- Inertie à certains produits chimiques courants (solvants, peinture, huiles, Pétroles,...),
- Tenue aux impacts et aux chocs très moyenne, Très forte anisotropie [1].

### **I.9 Domaines d'application**

Les excellentes performances mécaniques des matériaux composites fibres résine en termes de caractéristiques spécifiques en font des matériaux attrayants pour l'utilisation dans les structures. En outre, l'intérêt de ces matériaux réside dans leur anisotropie aisément contrôlable par le concepteur qui peut ainsi ajuster la rigidité et la résistance en fonction des sollicitations extérieures. Ainsi l'immense avantage des matériaux composites est de pouvoir être optimisé pour chaque application : on peut placer le renfort exactement où il est nécessaire. Cette optimisation résulte en une grande performance de ces matériaux, qui sont souvent de loin les plus légers pour une résistance mécanique spécifiée. Cependant ils restent très chers à fabriquer! D'où leurs domaines d'application :

- Electricité et électronique,
- Bâtiment et travaux publics,
- Transports routiers, ferroviaires, maritimes, aériens et spatiaux (notamment militaire),
- Santé (instrumentation médicale),
- Sports et loisirs (skis, raquette de tennis, planche à voile, surf ...)
- Construction navale...

Ainsi, on note que les matériaux composites sont surtout utilisés pour des applications où une haute performance est recherchée et où le prix n'est pas le facteur primordial[5].

**I.10 Les matériaux composites dans la construction navale****I.10.1 Généralités sur la construction navale**

L'industrie de la construction navale englobe la réparation navale, la déconstruction, industrie naissante et va englober un secteur énergies marines. La construction navale se positionne sur des navires à forte valeur ajoutée, de très grandes spécificités : paquebots, navires à grande vitesse, sous-marins, navires furtifs, navires de pêche : du grand thonier océanique au plus petit côtier, navires de recherche, de servitude, de l'offshore des pétrolier... de ce fait les professionnels employés couvrent un spectre de compétences quasi infini, de grande capacité d'adaptation à l'innovation, et à des niveaux de responsabilité très divers. Les techniques les plus en pointe sont en permanence mise en œuvre. Ces professionnels se retrouvent tant dans les chantiers eux-mêmes (ensemblers) que chez les fournisseurs et les sous-traitants. Ces derniers représentent souvent plus de la moitié de la valeur du navire. Par la suite les tâches de l'architecte naval sont de deux ordres : le dessin proprement dit du navire (Carène, pont, voilure, etc.) et tous les calculs y afférents. Ce travail suppose donc de bonnes connaissances en mathématiques, physique, résistance des matériaux, dessin industriel, informatique[9].

**I.10.2 Activités de la construction navale**

La construction navale est devenue progressivement une véritable industrie. L'activité de construction de la construction navale est, en majeure partie, orientée vers la satisfaction des besoins de la flotte de commerce et de la pêche. Elle s'exerce également pour le compte des marines militaires. Elle est complétée par l'activité de réparation navale, parfois menée par les mêmes chantiers. En dépit de fluctuations conjoncturelles souvent importantes, ce marché se caractérise sur le long terme par une tendance expansionniste due en particulier à l'augmentation continue de la population, à l'élévation de son niveau de vie ou encore au développement du phénomène de Mondialisation

Parallèlement, les produits de cette industrie se diversifient, par exemple dans l'offshore pour l'exploitation des hydrocarbures ou des énergies marines renouvelables (éoliennes offshore), et ils intègrent de plus en plus de nouvelles technologies. Le travail des chantiers s'en trouve évidemment modifié, les méthodes de conception et les procédés de fabrication des navires faisant de leur côté appelle aux technologies les plus élaborées.

Le métier de la construction navale consiste donc essentiellement à concevoir le navire, puis à intégrer des éléments techniques très divers en vue de réaliser le système complexe que constitue tout navire moderne.

### **I.10.3 Les matériaux de construction d'un navire**

La construction d'un navire est un processus complexe d'une haute technicité. Elle demande la collaboration étroite de nombreux personnels qualifiés et d'une main-d'œuvre contractuelle qui travaille en général sous la direction d'un entrepreneur principal. On construit des bateaux à des fins commerciales ou militaires. C'est une activité à caractère international, où quelques grands chantiers navals se battent pour conquérir leur part d'un marché relativement restreint. La coque est l'enveloppe extérieure du navire, elle est constituée du bordé, est étanche pour la partie immergée (œuvres vives) et a, généralement, des formes étudiées pour que le bateau puisse se déplacer assez facilement dans l'eau. Jusqu'à une époque relativement récente, les coques étaient exclusivement réalisées en bois. Grâce à l'évolution des sciences et des techniques, les coques sont maintenant construites en matériaux très variés, chacun étant plus ou moins adapté à tel ou tel type de construction.

#### **a) la construction des navires en bois :**

- b) Il s'agit du matériau de construction historique, mais aussi du moins résistant lorsqu'il est utilisé en construction classique (bois massif). Par contre, en lamellé-collé, sa résistance est équivalente voire supérieure au composite pour un poids proche.

Différents types de constructions existent tels que :

#### **Le bois classique :**

Utilisé pendant des siècles, il donne des bateaux très solides mais aussi très lourds. Sa mise en œuvre nécessite un véritable savoir-faire.

#### **Le contreplaqué-époxy :**

Le contre plaqué grâce à l'époxy (100% étanche), retrouvé un réel intérêt dans la construction de bateaux modernes. Sa mise en œuvre est très simple, grâce à l'utilisation de machines de découpe modernes. Au risque de devoir convaincre les sceptiques, à masse égale, une construction en contreplaqué-époxy renforcé de tissus de verre multiaxiaux, serait équivalente voire supérieure à une construction en aluminium ou en acier.

On obtient des bateaux légers, très solides y compris à l'impact, grâce à l'adjonction de renforts stratifiés (verre, carbone, ou kevlar). Leur résistance à la fatigue est excellente, leur entretien réduit au minimum et il est facile de les rénover au bout de quelques années. Par ailleurs ils ne subissent pas les détériorations dues à l'osmose, l'électrolyse ou l'oxydation, types de réactions induites par l'eau.



**Figure I.13** Construction des navires en bois

**a)** Charpente en bois classique. **b)** Bateau en contreplaqué-époxy.

**b)** la construction des navires en acier.

Du fait de son poids, l'utilisation de ce matériau est réservée à la construction des unités de plus de 15m. L'acier est actuellement le matériau le plus répandu (en considérant le tonnage de la flotte mondiale). C'est aussi le plus durable et solide, avec notamment une énorme résistance aux chocs. Sur certains voiliers de plaisance, on utilise également l'acier inoxydable, peu utilisé car cher. Le coût est raisonnable, quoiqu'il s'agisse d'un argument de moins en moins vrai. Sa mise en œuvre demande un véritable savoir-faire, les réparations peuvent se faire partout, même en dehors d'un chantier.



a) Charpente en acier b) Navire en acier

**Figure I.14 :** Construction des navires en acier

### c) la construction des navires en Aluminium

L'aluminium plus moderne, il reprend la plupart des qualités de l'acier, en éliminant les défauts. Les avantages qui le font préférer à l'acier sont la légèreté, la résistance à la corrosion (traitements par réaction du zinc silicate en phase aqueuse), le non magnétisme, donc l'absence d'interférence avec le matériel de bord (compas). Par ailleurs, on constate une grande résistance mécanique, surtout pour les constructions en fortes épaisseurs types «Strongall », qui perd par contre en légèreté donc en performances. C'est aujourd'hui le résolu au détriment de l'esthétique, en laissant la coque brute.



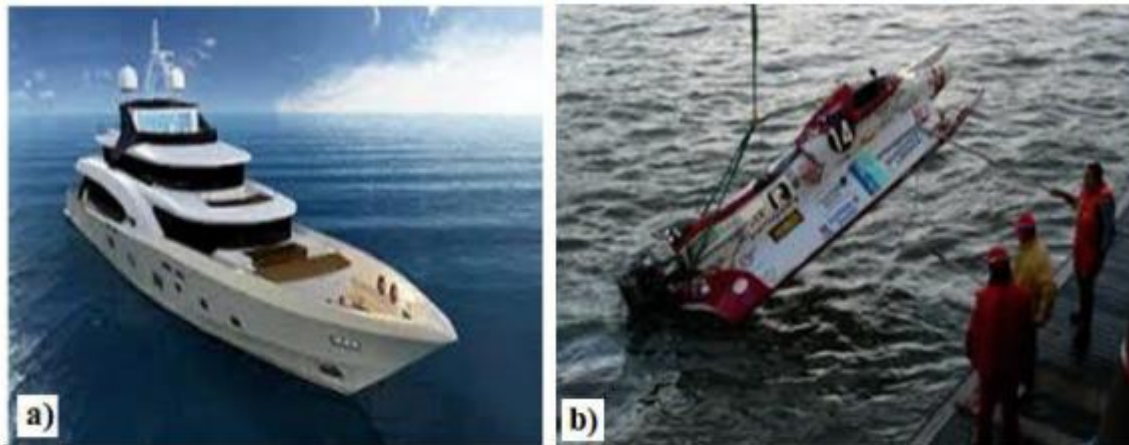
a) Charpente en aluminium

b) Navire en aluminium

**Figure I.15 :** Construction des navires en aluminium

**d) la construction des navires en matériaux composites**

Les matériaux composites modernes permettent la construction en série de bateaux, et donc l'abaissement des coûts de production. Ce type de construction actuelle est réalisé à partir d'un moule sur lequel on superpose des couches de fibre de verre et de résine. Ils comprennent le ferrociment, le polyester stratifié, les plastiques, les sandwichs. Pour les bateaux de course, on remplace la fibre de verre par de la fibre de carbone, plus résistante.



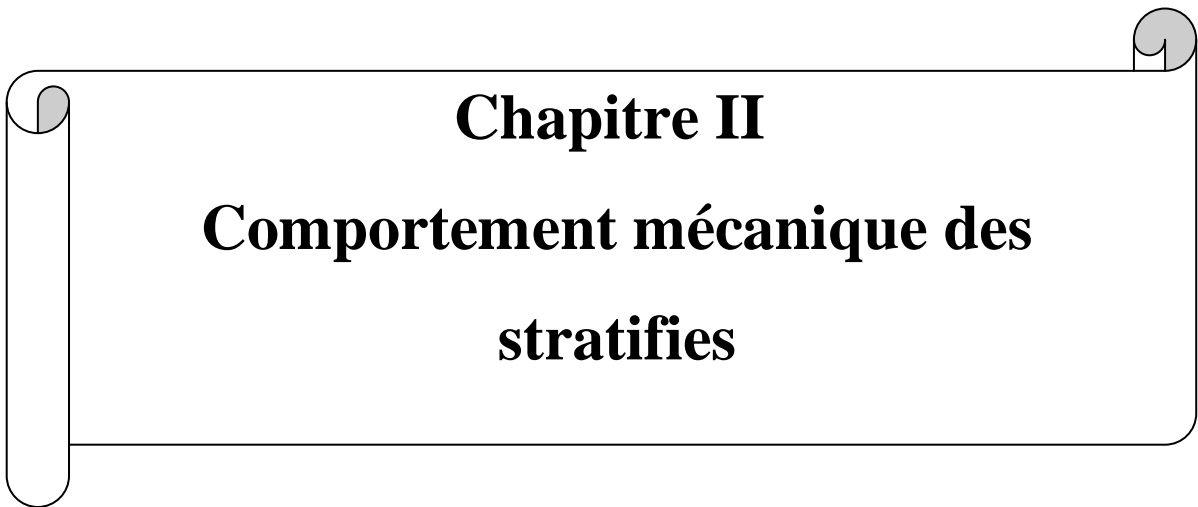
a) Navire de plaisance b) Navire de course en composite

**Figure I.16 :** Construction des navires en matériaux composites

Le choix du matériau de construction est important, il doit répondre à différents critères tels que le coût d'acquisition, le coût d'entretien, la facilité d'entretien, la sécurité, le confort, l'esthétique, la revente... Mais surtout ce choix doit correspondre au programme de navigation envisagé. Ajoutons toutefois qu'à moins de raisons particulières comme le goût pour la tradition ou le plaisir d'entretenir un gréement de collection, il est raisonnable de s'orienter vers un matériau moderne, les composites polyesters ayant remplacé l'acier, qui lui même a remplacé le bois. Une mention particulière à l'aluminium qui constitue la solution idéale pour les grandes croisières hauturières.

**Conclusion**

Nous avons donné dans ce chapitre un aperçu sur les matériaux composites du point de vue constitution, mode d'élaboration et leur importance dans la construction navale, Il reste à les présenter en termes mécaniques. L'utilisation des matériaux composites est élargie d'une manière importante vu leurs bonnes caractéristiques mécaniques du point de vue qualité/ prix. Les caractéristiques mécaniques ne peuvent être connues qu'avec des méthodes expérimentales sur des éprouvettes normalisées tel que les essais mécaniques de traction et de flexion et autres méthodes de caractérisation qui seront l'objet du chapitre suivant.



**Chapitre II**  
**Comportement mécanique des**  
**stratifiés**

## II.1 Stratifié :

On appelle stratifié un matériau composé d'un ensemble ordonné de couches d'orientation et d'épaisseur données. Une couche d'un stratifié est souvent appelée une strate ou pli. Le type de stratifié est défini généralement par sa séquence d'empilement. L'avantage que présentent les composites stratifiés est de permettre de créer des matériaux aux propriétés mécaniques orientées de manière optimale afin de mieux répondre aux sollicitations de la structure [10].

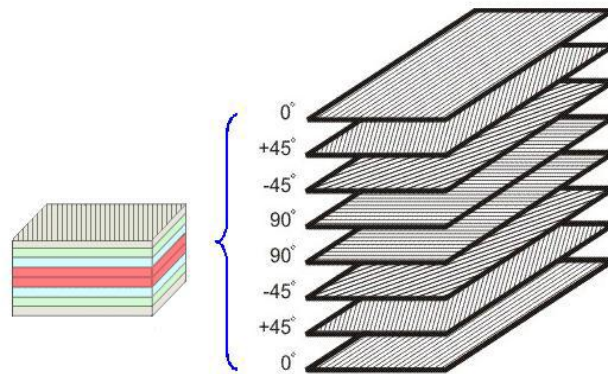


Figure II.1 Structure d'un stratifié [11].

## II.2 Types des stratifiés :

- **Stratifiés symétriques :**

Un stratifié est symétrique si le plan moyen est le plan de symétrie. Deux couches symétriques ont :

- La même matrice de rigidité  $[Q_{ij}]_k$ .
- La même épaisseur  $e_k$ .
- Des cotes opposées  $z_k$  et  $z_{k-1}$ .
- les coefficients  $[B_{ij}]$  de la matrice de rigidité du stratifié sont nuls [12].

D'où l'équation constitutive est :

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ T_{xy} \\ M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} & 0 & 0 & 0 \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} & 0 & 0 & 0 \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ 0 & 0 & 0 & D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ 0 & 0 & 0 & D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \\ K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{bmatrix}$$

• **Stratifiés antisymétriques :**

Constitué des couches en nombres pairs, dont la répartition des épaisseurs est symétrique, et celle des orientations des axes antisymétriques par rapport Au plan moyen. Deux couches des cotes antisymétriques ont donc :

- ✓ Des cotes opposées  $z_k$  et  $z_{k-1}$ .
- ✓ La même épaisseur  $e_k$ .
- ✓ Des orientations  $\theta$  et  $-\theta$  par rapport aux axes de référence du stratifié [12].

D'où l'équation constitutive est :

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ T_{xy} \\ M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & 0 & 0 & 0 & B_{16} \\ A_{12} & A_{22} & 0 & 0 & 0 & B_{26} \\ 0 & 0 & A_{66} & B_{16} & B_{26} & 0 \\ 0 & 0 & B_{16} & D_{11} & D_{12} & 0 \\ 0 & 0 & B_{26} & D_{12} & D_{22} & 0 \\ B_{16} & B_{26} & 0 & 0 & 0 & D_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \\ K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{bmatrix}$$

• **Stratifiés croisés :**

Constitués de couches dont les directions principales sont orientées alternativement à  $0^\circ$  ou  $90^\circ$  des directions de référence du stratifié [12].

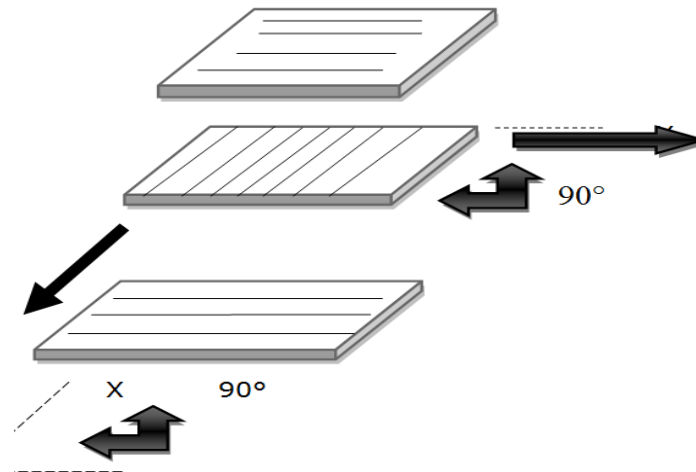


Figure II.2 Stratifié croisé [12].

L'équation constitutive est :

$$\begin{bmatrix} N_X \\ N_Y \\ T_{XY} \\ M_X \\ M_Y \\ M_{XY} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & 0 & B_{11} & B_{12} & 0 \\ A_{12} & A_{22} & 0 & B_{12} & B_{22} & 0 \\ 0 & 0 & A_{66} & 0 & 0 & B_{66} \\ B_{11} & B_{12} & 0 & D_{11} & D_{12} & 0 \\ B_{12} & B_{22} & 0 & D_{11} & D_{12} & 0 \\ 0 & 0 & B_{66} & 0 & 0 & D_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_X \\ \epsilon_Y \\ \gamma_{XY} \\ K_X \\ K_Y \\ K_{XY} \end{bmatrix}$$

- Stratifiés croisés symétriques:

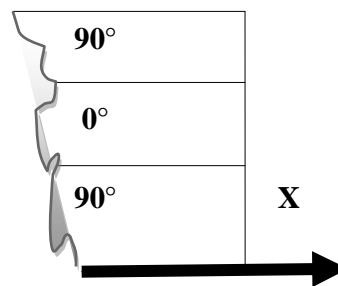


Figure II 3 Stratifié croises symétriques [12].

C'est un Stratifié croise dont le nombre de couches est impair L'équation constitutive est [15]  
:

$$\begin{bmatrix} N_X \\ N_Y \\ T_{XY} \\ M_X \\ M_Y \\ M_{XY} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ A_{12} & A_{22} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & A_{66} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & D_{11} & D_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & D_{12} & D_{22} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & D_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_X \\ \varepsilon_Y \\ \gamma_{XY} \\ K_X \\ K_Y \\ K_{XY} \end{bmatrix}$$

• **Stratifiés croisés antisymétriques :**

C'est un Stratifié croisé dont le nombre de couches est paire [12].

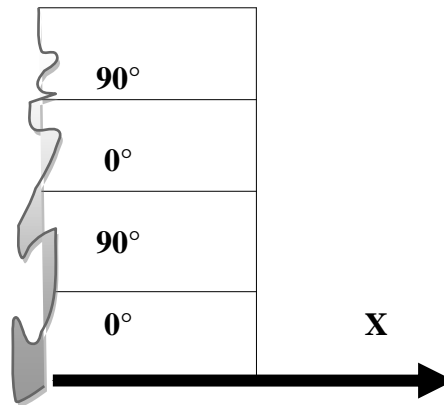


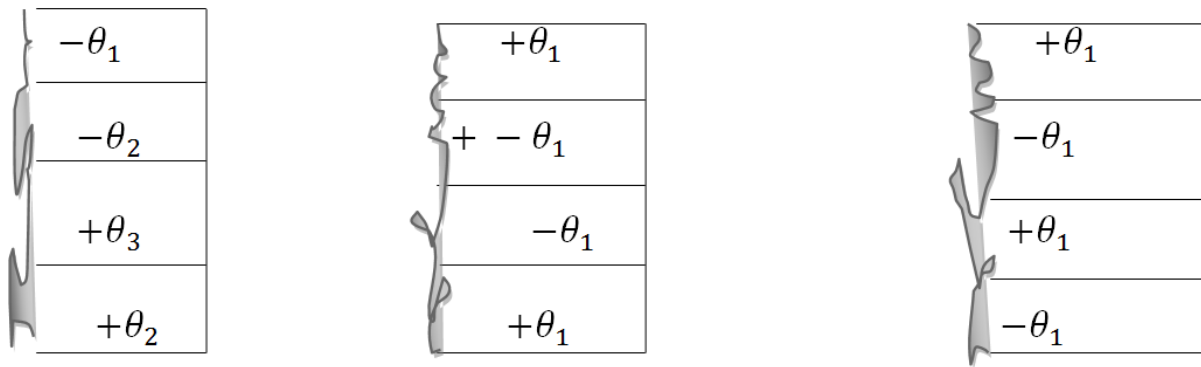
Figure II 4 Stratifié croisé antisymétrique [12].

L'équation constitutive est :

$$\begin{bmatrix} N_X \\ N_Y \\ T_{XY} \\ M_X \\ M_Y \\ M_{XY} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & 0 & B_{11} & 0 & 0 \\ A_{12} & A_{22} & 0 & 0 & -B_{11} & 0 \\ 0 & 0 & A_{66} & 0 & 0 & 0 \\ B_{11} & 0 & 0 & D_{11} & D_{12} & 0 \\ 0 & -B_{11} & 0 & D_{12} & D_{22} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & D_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_X \\ \varepsilon_Y \\ \gamma_{XY} \\ K_X \\ K_Y \\ K_{XY} \end{bmatrix}$$

• **Stratifiés équilibrés:**

Un stratifié est équilibré s'il comporte autant de couches orientées suivant un angle  $\theta$  que de couches orientées suivant un angle  $-\theta$ . Un stratifié équilibré peut être quelconque, symétrique ou antisymétrique [12].



a) Equilibré quelconque

b) Equilibré symétrique

c) Equilibré antisymétrique

Figure II 5 Stratifiés équilibrés [12].

- **Stratifiés alternés:**

Un stratifié alterné est constitué de couches orientées alternativement suivant les directions  $+\theta$  et  $-\theta$ , relativement aux axes de référence du stratifié [12].

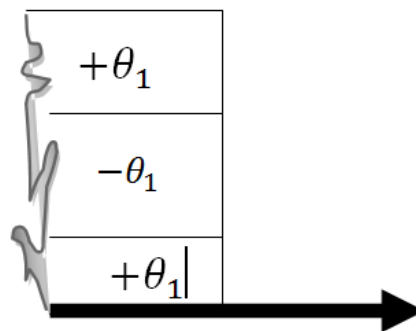


Figure II 6 Stratifié alterné [12].

- **Stratifiés à couches isotropes :**

Les stratifiés isotropes constitués des couches isotropes où l'orientation des plis n'influe pas sur le comportement du stratifié. La matrice de rigidité d'une couche isotrope est [12] :

$$Q = \begin{bmatrix} \frac{E}{1-\nu^2} & \nu \frac{E}{1-\nu^2} & 0 \\ \nu \frac{E}{1-\nu^2} & \frac{E}{1-\nu^2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{E}{2(1+\nu)} \end{bmatrix}$$

L'équation constitutive est :

$$\begin{bmatrix} N_X \\ N_Y \\ N_{XY} \\ M_X \\ M_Y \\ M_{XY} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & 0 & B_{11} & B_{12} & 0 \\ A_{12} & A_{22} & 0 & B_{12} & B_{11} & 0 \\ 0 & 0 & A_{66} & 0 & 0 & B_{66} \\ B_{11} & B_{12} & 0 & D_{11} & D_{12} & 0 \\ B_{12} & B_{11} & 0 & D_{12} & D_{22} & 0 \\ 0 & 0 & B_{66} & 0 & 0 & D_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_X \\ \varepsilon_Y \\ \gamma_{XY} \\ K_X \\ K_Y \\ K_{XY} \end{bmatrix}$$

On note que si le stratifié est symétrique  $B_{ij} := 0$

- **Stratifiés quasi-isotropes :**

Un stratifié est dite quasi-isotrope s'il est constitué des couches dont les directions principales sont orientées alternativement à :  $(0^\circ, -45^\circ, +45^\circ, 90^\circ)$  [12].

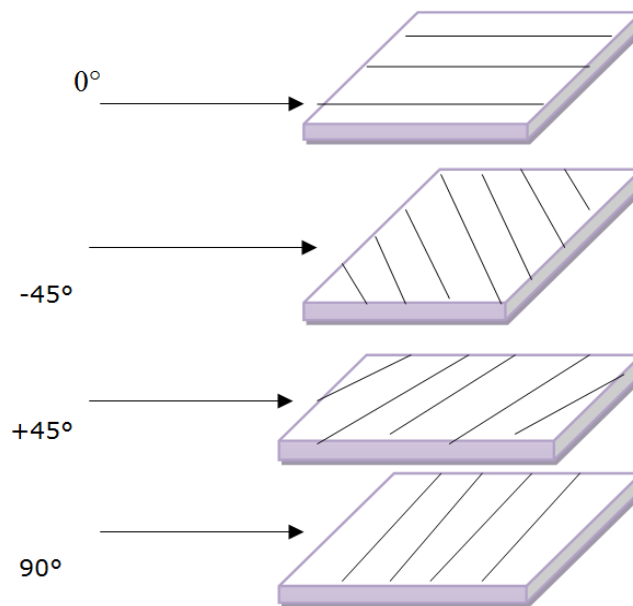


Figure II.7 Stratifié quasi-isotrope [12].

II.2.1 Pli unidirectionnel (monocouche) :

Les monocouches représentent l'élément de base de la structure composite. Les différents types de monocouches sont caractérisés par la forme du renfort :

- à fibres longues (unidirectionnelles UD, réparties aléatoirement).
- à fibres tissées, à fibres courtes [13].

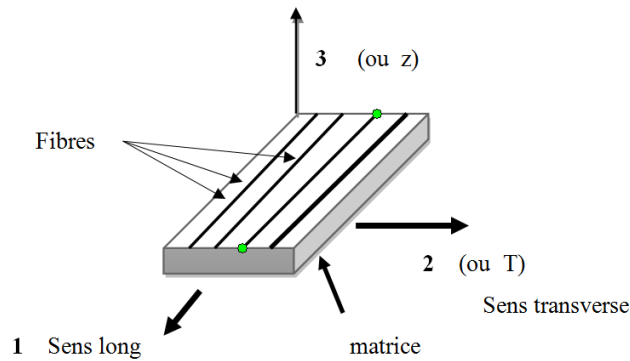


Figure II.8 plis à renforcement unidirectionnel [14].

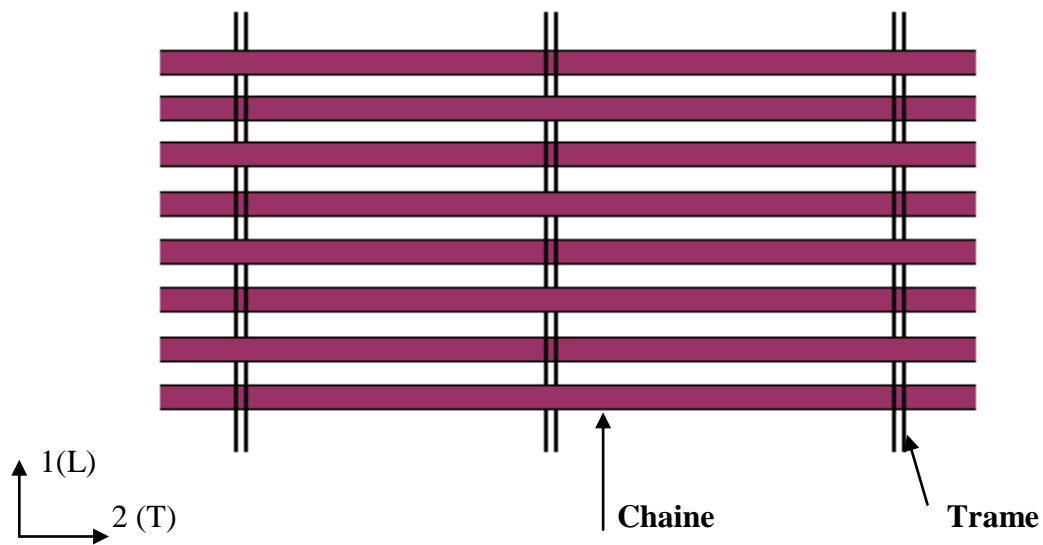
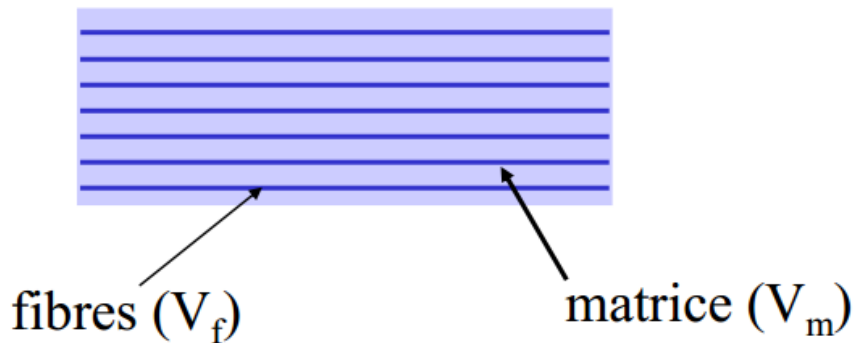


Figure II.9 Représentation d'un renfort unidirectionnel [11].

### II.2.2 Calculs d'un pli cas unidirectionnel :

Les composites sont composés de l'ensemble « matrice + renfort ». L'ajout du renfort augmente les propriétés mécaniques de la matrice renforcée. Considérons le composite unidirectionnel suivant [15]:



**Figure II.10** Structure d'un matériau composite unidirectionnel [15].

Ce matériau est non homogène et ses diverses propriétés dépendent de celles des fibres et de la matrice qui les constituent. Cependant, ce dernier, peut être supposé comme homogène en considérant ses propriétés moyennes vis-à-vis des charges externes appliquées. Le composite unidirectionnelle est supposé se comporté comme un matériau dont les propriétés mécaniques varient d'une direction à une autre mais semblable le long de ce matériau. Des expressions simplifiés et pratiques de ces composites peuvent être obtenus en adoptant une approche très simple du comportement mécanique d'un élément de volume de ce matériau [15] :

➤ **Fraction volumique :**

Considérons un volume du ce matériau composite, composé d'un volume de la fibre  $V_f$  et d'un volume de la matrice  $V_m$ . On définit :

La fraction volumique des fibres :  $V_f = \frac{V_f}{V_c}$ .

La fraction volumique de la matrice  $V_m = \frac{V_m}{V_c}$ .

Sachant que :

- $V_m = 1 - V_f$ .

- $V_c = V_m + V_f$ .

➤ **Fraction massique :**

Considérons la masse  $W_c$  du matériau composite, composé d'une masse  $W_f$  la fibre et une masse  $W_m$  de la matrice [15]. Les fractions massiques des fibres et de la matrice sont :

$$P_f = \frac{W_f}{W_c}$$

$$P_m = \frac{W_m}{W_c}$$

Avec :  $P_m + P_f = 1$

$$W_c = W_f + W_m$$

➤ **Relation entre fraction volumique et massique :**

$$W_c = \rho_c V_c$$

$$W_f = \rho_f V_f + \rho_m V_m$$

$$W_m = \rho_m V_m + \rho_f V_f$$

ou  $W_m = W_m + W_f$   $\Rightarrow$   $\left\{ \begin{array}{l} \rho_f V_f + \rho_m V_m = W_c \\ \rho_f \frac{V_f}{V_c} + \rho_m \frac{V_m}{V_c} = \rho_c \end{array} \right.$

$$\Rightarrow \rho_c = \rho_f V_f + \rho_m V_m$$

$$\Rightarrow \rho_c = \rho_f V_f + (1 - V_f) \rho_m$$

De plus :

$$V_c = V_f + V_m$$

$$\frac{W_c}{\rho_c} = \frac{W_f}{\rho_f} + \frac{W_m}{\rho_m}$$

$$\frac{W_c}{\rho_c} = \frac{W_f W_m + W_m \rho_f}{\rho_m \rho_f}$$

Ce qui donne :

$$\rho_c = \frac{\rho_m \rho_f W_c}{W_f \rho_m + W_m \rho_f}$$

$$= \frac{1}{\frac{W_f \rho_m}{W_c \rho_m \rho_f} + \frac{1}{\frac{W_m \rho_f}{W_c \rho_f \rho_m}}}$$

Finalement :

$$\rho_c = \frac{1}{\frac{p_f}{\rho_f} + \frac{p_m}{\rho_m}}$$

$$\Rightarrow \quad P_f = \frac{\rho_f}{\rho_c} V_f \quad \text{et} \quad p_m = \frac{\rho_m}{\rho_c} V_m$$

Donc :

$$V_f = \frac{\rho_c}{\rho_f} \cdot P_f$$

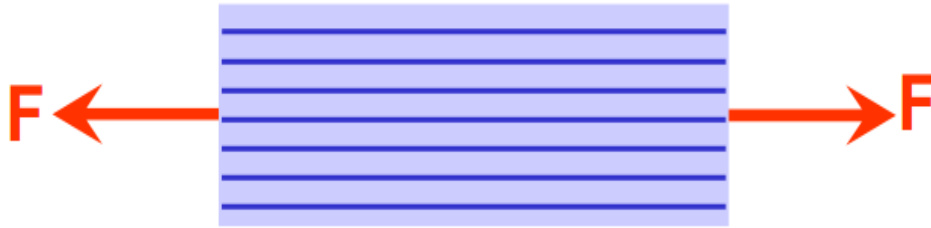
$$V_m = \frac{\rho_c}{\rho_m} \cdot P_m$$

### II.2.3 Evaluation des constantes élastiques d'un composite unidirectionnelle :

- **Module d'Young longitudinal : forces parallèles à la direction de la charge :**

Par essai de traction, le composite s'allonge d'une quantité  $\Delta_l$ , donc on définit une déformation  $\varepsilon_f = \frac{\Delta_l}{l}$ . L'identité de la déformation dans la fibre et dans la matrice [15]:

$$\varepsilon_f = \varepsilon_m = \varepsilon_l$$



**Figure II.11** Essai de traction longitudinale [15].

De plus on a :

$$\sigma_f = E_f \varepsilon_f = E_f \varepsilon_l \text{ et } \sigma_m = E_m \varepsilon_m = E_m \varepsilon_l$$

Avec  $S_m$  et  $S_f$  représentent les aires des sections droites de la fibre et de la matrice.

Sachant que :  $F_1 = F_f + F_m$  ce qui donne  $F_1 = \sigma_f S_f + \sigma_m S_m$

Soit  $S$  l'aire de la section droite du composite, donc :  $\sigma_1 = \frac{F_1}{S}$

Et par conséquent l'équation (A) nous donne :

$$\frac{F_1}{S} = \sigma_f \frac{S_f}{S} + \sigma_m \frac{S_m}{S}$$

Ainsi,  $\sigma_1 = \sigma_f V_f + \sigma_m V_m$  ou encore  $\sigma_1 = \sigma_f V_f + \sigma_m (1 - V_f)$  (b)

Sachant que :  $\sigma_1 = E_1 \varepsilon_1$

$$(b) \quad \Rightarrow \quad E_1 \varepsilon_1 = E_f V_f \varepsilon_1 + E_m \varepsilon_1 (1 - V_f)$$

$$E_1 = E_f V_f + E_m (1 - V_f)$$

Cette expression est connue sous le nom de 'loi des mélanges' pour le module d'Young dans la direction des fibres.

- **Module d'Young transversal :** forces perpendiculaire la direction des fibres.
- Le module d'Young transversal est déterminé dans un essai de traction transversal où le composite est chargé suivant la direction normal de la fibre [15]. On définit :

$$V_f = \frac{h_f}{h_f + h_m}, V_m = (1 - V_f)$$

Dans ce cas on a :  $\sigma_2 = \sigma_m = \sigma_f$

$$\text{Donc, } \varepsilon_m = \frac{\sigma_f}{E_f} = \frac{\sigma_2}{E_f}, \varepsilon_m = \frac{\sigma_m}{E_m} = \frac{\sigma_2}{E_m}$$

Sachant que l'allongement du composite est défini par :

$$\Delta l_2 = \Delta l_f + \Delta l_m \quad \text{Ce qui donne :}$$

$$\Delta l_2 = \varepsilon_f h_f + \varepsilon_m h_m \quad \text{Et la déformation du composite est donné par } \varepsilon_2 = \frac{\Delta l_2}{h_t}$$

Ainsi :

$$\frac{\Delta l_2}{h_t} = \frac{\Delta l_2}{h_f + h_m}$$

$$\varepsilon_2 = \frac{h_f}{h_f + h_m} \varepsilon_f + \frac{h_m}{h_f + h_m} \varepsilon_m$$

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_f V_f + \varepsilon_m (1 - V_f)$$

$$\text{Si: } \sigma_2 = E_2 \varepsilon_2 \quad \Longrightarrow \quad \varepsilon_2 = \frac{\sigma_2}{E_2}$$

$$\varepsilon_m = \frac{\sigma_m}{E_m}, \varepsilon_f = \frac{\sigma_f}{E_f}$$

$$\frac{\sigma_2}{E_2} V_f + \frac{\sigma_2}{E_m} (1 - V_f)$$

Et finalement on obtient :

$$\frac{1}{E_2} = \frac{V_f}{E_f} + \frac{1 - V_f}{E_m}$$

$$\text{Donc on a : } E_T = \frac{E_f E_m}{E_f (1 - V_f) + E_m V_f}$$

➤ **Coefficient de poisson longitudinal :**

Par essai de traction, l'allongement du composite sera  $\Delta l$  et sa déformation sera  $\varepsilon_2 = \frac{\Delta l}{l}$

$\varepsilon_m = \varepsilon_f = \varepsilon_1$ , Pour la déformation dans la direction 2 on a :

- Pour la fibre :  $\varepsilon_{2f} = -\gamma_f \varepsilon_1$
- Pour la matrice :  $\varepsilon_{2m} = -\gamma_m \varepsilon_2$

L'allongement transversal du composite est  $\Delta_h = \Delta_{hf} = \Delta_{hm}$

$$\Delta_h = \varepsilon_{2f} h_f + \varepsilon_{2m} h_m$$

Et la déformation totale du composite :

$$\varepsilon_2 = \frac{\Delta h}{h_m - h_f}$$

$$\varepsilon_2 = \frac{-\gamma_f h_f \varepsilon_1 - \gamma_m \varepsilon_1 h_m}{h_m + h_f}$$

$$-\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} = \gamma_f V_f + \gamma_m (1 - V_f) \quad [18].$$

- **Sens quelconque :**

On a  $\sigma = \frac{F}{S}$

$\sigma_l = \sin^2 \theta$ ,  $\sigma_l$  contrainte longitudinal (sur les fibres).

$\sigma_T = \sigma \sin^2 \theta$ ,  $\sigma_T$  contrainte transverse (sur la matrice).

- Cisaillement :  $\tau = \frac{FL}{ST} = \frac{FT}{ST} = \frac{F \sin \theta \cos \theta}{S}$

- **Calcul de module de cisaillement :**

Même contrainte de cisaillement sur fibre et matrice

$$\tau = \sigma_m \gamma_m = G_f \gamma_f = G_\gamma$$

$$\gamma = \frac{f_m \cdot \gamma_m + f_f \cdot \gamma_f}{1}$$

$$\tau = G_\gamma = G \left( f_m \frac{\tau}{G_m} + f_f \frac{\tau}{G_f} \right)$$

$$\frac{1}{G} = \frac{f_m}{G_m} + \frac{f_f}{G_f}$$

$$G = \frac{G_m \cdot G_f}{f_m \cdot G_f + f_f \cdot G_m}$$

- **Module de Young dans la direction quelconque :**

$$\text{La contrainte } \underline{\sigma} = \sigma \theta. \quad \left| \begin{array}{l} \sin^2_\theta \\ \cos^2_\theta \\ \sin\theta \cos\theta \end{array} \right.$$

$$\sigma \theta = \frac{F}{S}$$

$$\underline{S} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 \\ S_{12} & S_{22} & 0 \\ 0 & 0 & S_{33} \end{bmatrix}$$

D'où la déformation:

$$\underline{\varepsilon} = \underline{\sigma} \underline{S}, \quad \varepsilon = \sigma \theta$$

$$\left| \begin{array}{l} S_{11} \cos^2_{(\theta)} + S_{12} \sin^2_{(\theta)} \\ S_{12} \cos^2_{(\theta)} + S_{22} \sin^2_{(\theta)} \\ S_{33} \sin_{(\theta)} \cos_{(\theta)} \end{array} \right.$$

La déformation dans la direction ( $\theta$ ) est donnée par le produit scalaire suivant:

$$\varepsilon_{(\theta)} = \underline{\varepsilon} \cdot \left| \begin{array}{l} \cos^2_{(\theta)} \\ \sin^2_{(\theta)} \end{array} \right.$$

$$\text{D'où: } \left| \begin{array}{l} \cos^2_{(\theta)} \\ \sin^2_{(\theta)} \end{array} \right.$$

$$\sin(\theta) \cos(\theta)$$

$$\varepsilon_\theta = \sigma_\theta (S_{11} \cos^4(\theta) + S_{22} \sin^4(\theta) + 2(S_{12} + S_{13}) \sin^2(\theta) \cos^2(\theta))$$

Donc, le module de Young dans la direction de  $E_\theta := \frac{\sigma_\theta}{\varepsilon_\theta}$

Tel que :  $\varepsilon_\theta = \frac{\Delta L}{L_0}$

$$E_\theta = \frac{1}{S_{11} \cos^4 \theta} + \frac{1}{S_{22} \sin^4 \theta} + \frac{1}{2(S_{12} + S_{13}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta} \quad [20].$$

➤ **Matrices de souplesse et de rigidité dans le repère du pli (1,2) :**

- **Matrice de souplesse  $[S_{ij}]$  :**

La matrice de souplesse du  $k$ -ième pli est définie par la relation entre les déformations et les contraintes. Les coefficients caractérisent la souplesse du matériau [11]:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 \\ S_{21} & S_{22} & 0 \\ 0 & 0 & S_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

Les coefficients de souplesse sont définis par :

$$S_{11} = \frac{1}{E_1} \quad S_{12} = S_{21} = -\frac{\nu_{21}}{E_2} = -\frac{\nu_{12}}{E_1}$$

$$\begin{aligned} S_{22} &= \frac{1}{E_2} & S_{16} = S_{61} &= 0 & \implies & \text{montre qu'il n'y a pas de couplage plan entre} \\ S_{66} &= \frac{1}{E_6} & S_{26} = S_{62} &= 0 & & \text{contraintes normales et contraintes de cisaillements} \end{aligned}$$

(1) Peut aussi être écrite sous la forme matricielle compacte :

$$[\varepsilon]_{1,2}^{(k)} = [S_{ij}]_{1,2}^{(k)} \{\sigma\}_{1,2}^{(k)} \quad (2)$$

La matrice  $[S_{ij}]$  est appelée matrice de souplesse, elle possède une symétrie  $S_{ij} = S_{ji}$  [11].

Les termes nuls ( $S_{16} = S_{61} = S_{26} = S_{62} = 0$ ) montrent qu'il ne peut avoir de couplage plan entre les contraintes normales et les contraintes de cisaillement; car, pour un pli, le matériau est considéré comme orthotrope dans son repère principal (1,2) [11].

- **Matrice de rigidité [Qij] :**

La matrice de rigidité du  $k$ -ième pli est définie par la relation entre les contraintes et les déformations. Autrement dit, c'est l'inverse de la relation (1) [11]; c'est-à-dire:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{21} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} \quad (3)$$

Les coefficients  $Q_{ij}$  caractérisent la rigidité du matériau; ces derniers sont définis par :

$$Q_{11} = mE_1 \quad Q_{12} = Q_{21} = m\gamma_{12} E_2 = m\gamma_{21} E_1$$

$$Q_{22} = m E_2 \quad Q_{16} = Q_{61} = 0$$

$$Q_{66} = G_{12} \quad Q_{26} = Q_{62} = 0$$

Avec :  $m = \frac{1}{1 - \gamma_{12} \gamma_{21}}$

La matrice  $[Q_{ij}]$  est appelée matrice de rigidité, elle est symétrique  $Q_{ij} = Q_{ji}$

La relation (3) peut aussi être écrite sous la forme matricielle compacte :

$$\{\sigma\}_{1,2}^{(k)} = [Q_{ij}]_{1,2}^{(k)} \{\varepsilon\}_{1,2}^{(k)} \quad (i,j = 1,2,6) \quad (4)$$

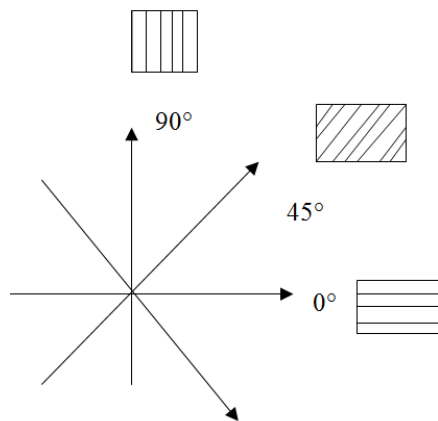
Les termes nuls ( $Q_{16} = Q_{61} = Q_{26} = Q_{62} = 0$ ) montrent qu'il ne peut avoir de couplage plan entre les déformations normales et angulaires; car, pour un pli, le matériau est considéré comme orthotrope dans son repère principal (1,2).

On remarquera que les matrices  $[S_{ij}]$  et  $[Q_{ij}]$  sont inverses l'une de l'autre, c.-à-d. :

$$Q_{ij} = S_{ij}^{-1} \quad (5)$$

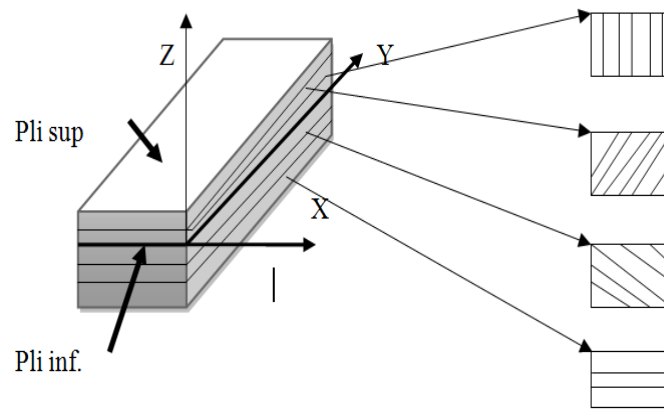
### II.3 Code de représentation d'un stratifié:

- **Les orientations normalisées :** les orientations les plus fréquemment utilisées sont représentées comme suit :



La direction dite « à 0° » correspond à la direction d'application de l'effort prépondérant, ou à une direction privilégiée de la pièce considérée, ou à l'axe des abscisses du repère choisi.

**Plan moyen :** c'est par définition le plan qui sépare en deux moitiés l'épaisseur du stratifié. sur la figure ci-après, c'est le plan x, y .il a pour cote, par convention :  $z = 0$  [22].



**Figure II.12** Orientation de stratifié dans le plan moyen [18].

- **Description des plis** : elle se fait depuis le pli extrême de cote  $Z < 0$ .

Jusqu'au pli extrême  $Z > 0$ .

- Chaque pli est repéré par son orientation.
- Les plis successifs sont séparés par un « l ».
- Il faut éviter de grouper un trop grand nombre de plis contigus dans une même direction (afin de limiter les contraintes inter-pli, dites »inter-laminaire) : néanmoins lorsque cela se produit, un chiffre en indice indique le nombre des plis identiques.
- **Symétrie miroir** : on dit qu'une pièce stratifié est dotée de la « symétrie miroir » lorsque les empilements de plis de part et d'autre du plan moyen sont identiques. Lors de la symétrie miroir est réalisée, la pièce stratifiée entraîne la symétrie de ces contraintes et empêche ainsi l'apparition des déformations d'ensemble de la pièce : voilement, gauchissement [18].
- **Cas particulier des tissus équilibrés** : certains stratifiés sont constitués partiellement ou totalement de couche de tissu équilibré. On fait alors figurer sur le dessin un schéma décrivant la composition du stratifié [18]:

Ce stratifié constitué de 3 couches de tissus équilibrés pourvu de la symétrie miroir : on considère en effet qu'une couche tissée est équivalente à deux séries de plis unidirectionnel croisés  $+90^\circ$  et donc est elle-même pourvue de la symétrie miroir (vérifiée une toile, un taffetas) :

- ✓ Chaque couche de tissu est remplacée par 2 séries de plis unidirectionnels identiques, croisés à 90°, d'épaisseur moitié de l'épaisseur  $e$  de la couche de tissu, et dont on connaît les propriétés élastiques. Cette représentation est commode pour la détermination des propriétés élastiques du stratifié.
- ✓ Une couche de tissu est remplacée par un seul pli anisotrope d'épaisseur  $e$  dont on connaît les propriétés élastiques et limites de rupture. Cette représentation est utile pour la détermination des contraintes de rupture du stratifié.
- ✓ On prévoit en général une proportion minimum de plis (de 5 à 10 %) suivant chaque direction : 0°, 90°, +45°, -45°. Prennent en compte les sollicitations mécaniques qui s'exercent sur le stratifié dans la zone considérée. Un cas courant consiste à solliciter le stratifié dans son plan. On dit alors qu'il travaille en membrane (c.-à-d. le stratifié travaille à la flexion). Les sollicitations mécaniques prennent la forme de la contrainte  $(\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy})$  ou de flux d'efforts  $(N_x, N_y, T_{xy})$ , le flux d'effort étant le produit de la contrainte par l'épaisseur  $h$  du stratifié.
- ✓ L'épaisseur minimum d'un stratifié doit être de l'ordre du millimètre par exemple, 8 plis unidirectionnels ou 3 à 4 couches de tissu équilibré carbone/époxyde [18].

#### II.4 Détermination des caractéristiques pour un pli unidirectionnel :

Si l'on considère la matrice de souplesse comme présentée précédemment, le comportement isotrope transverse d'un pli unidirectionnel est déterminé par les modules  $E_L$ ,  $E_T$ ,  $G_{LT}$ ,  $\nu_{LT}$ . Des essais simples permettent de mesurer ces caractéristiques. Les chargements utilisés, sauf pour  $G_{LT}$ , permettent de placer en état de contraintes planes [17].

##### II.4.1 Essai de traction longitudinale :

On applique un chargement  $F$  dans la direction  $*L*$  des fibres. On est dans le repère d'orthotrope du matériau. Si  $S$  est l'aire de la section, l'état de contrainte associé est [17]:

$$\sigma_1 = \frac{F}{S}, \quad \sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_4 = \sigma_5 = \sigma_6 = 0$$

On mesure les allongements longitudinaux (direction 1)  $\Delta L_L$  et transversaux (direction 2)  $\Delta L_T$ . Les déformations associées sont :

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta L_L}{L_L}, \quad \varepsilon_2 = \frac{\Delta L_T}{L_T}$$

Où  $L_l$  est la longueur de la partie utile de l'éprouvette et  $L_T$  la largeur.

La loi de comportement définie par la matrice de souplesse conduit à :

$$E_l = \frac{\sigma_1}{\varepsilon_1} \quad , \quad \nu l_T = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}$$

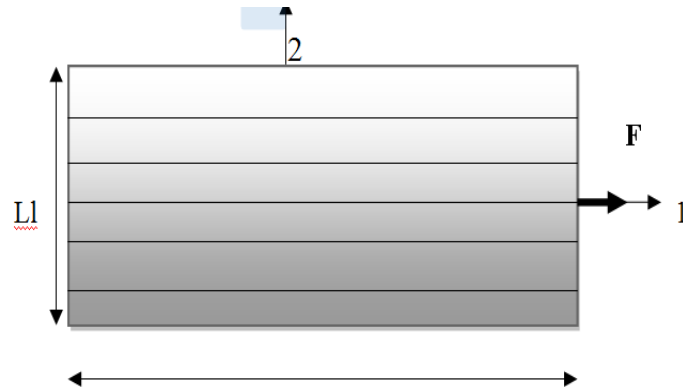


Figure II.13 Traction longitudinale [17].

**II.4.2 Essai de traction transversale :**

Cette fois-ci, on applique un chargement F dans la direction transversale \*T\* perpendiculaire aux fibres dans ce cas [17]:

$$\sigma_2 = \frac{F}{S} \quad , \quad \sigma_1 = \sigma_3 = \sigma_4 = \sigma_5 = \sigma_6 = 0$$

En utilisant les mesures de déformations longitudinale et transversale, on obtient de la même

Manière :

$$E_T = \frac{\sigma_2}{\varepsilon_2} \quad , \quad \nu T_l = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}$$

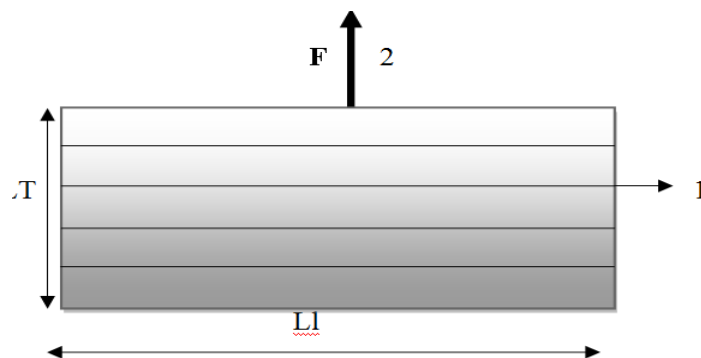


Figure II.14 Traction transversale [17].

II.4.3 Essai de traction hors axes :

On utilise ici une éprouvette soumise à un chargement  $F$  qui fait un angle de  $45^\circ$  avec l'orientation des fibres. Nous ne sommes plus dans les axes d'orthotrope et on utilise alors la relation de comportement définie par (figure II.10) et (figure II.11) avec  $\theta = 45^\circ$  [17].

L'état de contrainte associé est :

$$\sigma'_1 = \frac{F}{S} \quad , \quad \sigma'_2 = \sigma'_3 = \sigma'_4 = \sigma'_5 = \sigma'_6 = 0$$

La mesure de la déformation longitudinale  $\varepsilon'_1$  donne :

$$S'_{11} = \frac{1}{4} (s_{11} + S_{22} + 2S_{12} + S_{66}) = \frac{\varepsilon'_1}{\sigma'_1}$$

On en déduit que :

$$\frac{1}{GL_T} = 4 S'_{11} - \frac{1}{E_l} - \frac{1}{E_T} + \frac{2\nu T_L}{E_T}$$

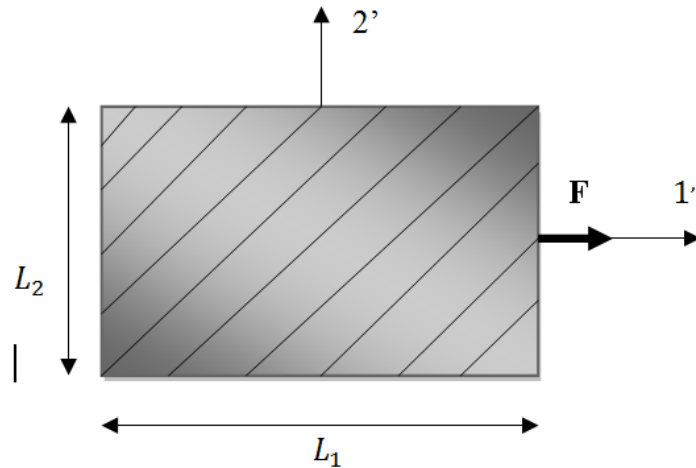


Figure.II.15 Traction hors axes [17].

En résumé de ces essais, le tableau ci-dessous donne certains résultats expérimentaux [17] :

**Tableau II.1** : comparaison de différents composites [17].

composite	$E_l$ (GPa)	$E_T$ (GPa)	$Vl_T$	$GL_T$ (GPa)	$G_T$ (GPa)
Epoxy/fibre de verre	46	10	0,31	4,7	4
Epoxy/fibre de carbone	159	14	0,32	4,8	4,3
Epoxy/fibre de kevlar	84	5,6	0,34	2,1	2,1

**II.5 Essai de cisaillement inter – laminaire :**

IL s’agit du cisaillement dans un plan perpendiculaire aux strates (plis) de type 1,3 ou X, Z. L’essai consiste à réaliser une flexion 3 points sur appuis rapprochés ( $L/ e = 5$ , ci-dessous) suivant les normes ISO 4585, ASTM D 2344, EN 2377) [21].

On exploite les efforts tranchant qui génèrent une contrainte  $\tau_{LZ}$  qui maximale dans le plan médian, la contrainte ultime en cisaillement inter- laminaire (délaminage) est alors donnée

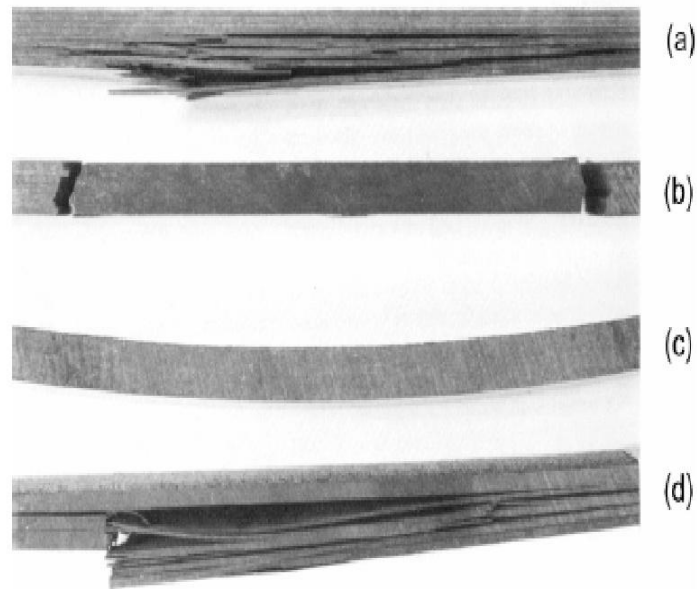
Par : 
$$\dot{S} = \frac{3p \max}{4 B e}.$$

**Remarque** : ce type d’essai est aussi utilisé sur les composites unidirectionnels pour estimer la qualité de l’adhésion inter faciale. Il conduit cependant à des résultats qualitatifs. Un essai plus direct est schématisé (ci –dessous) deux entailles opposées délimitent un ligament d’aire  $H e$ . Il est alors possible de mesurer la contrainte ultime de rupture de ce ligament en cisaillement soit particulièrement soigné, avec éventuellement guidage.

**II.6 Les mécanismes d’endommagement :**

**II.6.1 Les mécanismes de rupture des stratifiés composites à renforts de fibres longues :**

La rupture des stratifiés composites peut se produire de plusieurs façons très complexes. Les modes de rupture dépendent de la stratification et de la direction du chargement par rapport à l’orientation des fibres

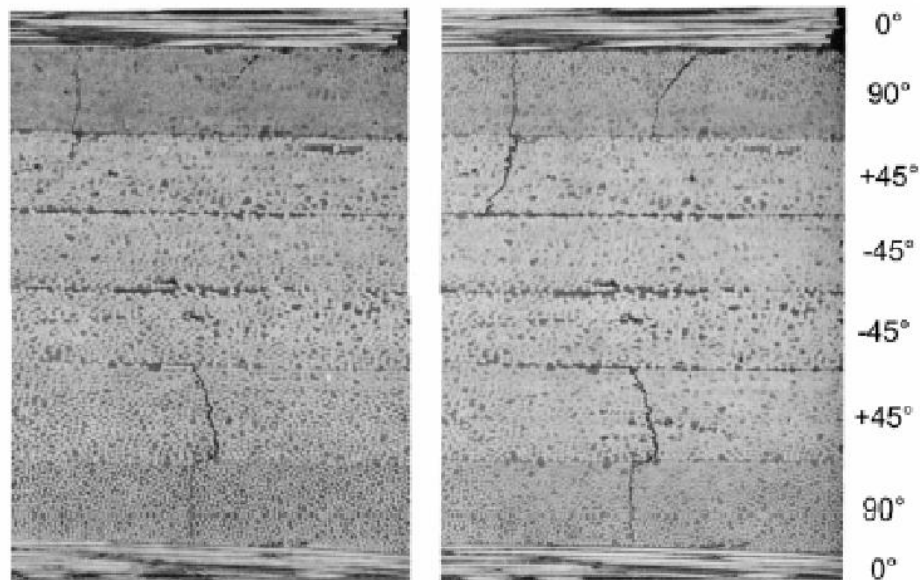


**Figure.II.16** Ruptures par flexion de différentes séquences d'empilement

a) Quasi-isotrope, b) Unidirectionnel, c)  $\pm 45$ , d) 0/90

#### **II.6.1.1. Rupture intralaminare:**

La rupture intralaminare est due principalement à la faible résistance de la matrice et de l'adhérence entre la matrice et les fibres. Elle est provoquée par les contraintes dans le plan du stratifié. Un pli se détériore par la contrainte résultante en traction dans la direction normale aux fibres. Ce type de rupture est donc couramment appelé la « fissuration transverse ». Normalement cette fissuration de la matrice se produit bien avant la rupture de fibre.



**Figure.II.17** Evolution de la fissuration transverse

#### **II.6.1.2. Rupture interlaminaire:**

La rupture interlaminaire se produit dans l'interface entre deux plis d'un stratifié. La surface de rupture montre, en général, la rupture de la matrice et la décohésion fibre/matrice. Ces mécanismes impliquent peu la rupture de fibres

#### **II.6.1.3. Rupture translaminaire:**

La rupture translaminaire concerne la rupture de fibres. Les surfaces de rupture sont donc généralement marquées par la morphologie rugueuse des bouts de fibres. En effet, la contrainte à rupture des fibres est plus importante que celle de tous les autres constituants d'un stratifié composite. Par conséquent, ce mécanisme de rupture entraîne souvent la rupture totale du stratifié. La rupture translaminaire peut être séparée en deux modes selon les chargements : la rupture par traction et le micro-flambage par compression. La rupture peut être provoquée par un mode individuel ou une combinaison des deux modes

##### **II.6.1.3.1. Rupture translaminaire en traction:**

La rupture fragile des fibres est le mécanisme principal, avec la rupture de la matrice environnante considérée comme secondaire. Les fibres se cassent typiquement par paquets ; les fibres dans chaque paquet ont un plan de rupture commun. Différents plans de rupture sont ensuite joints par la décohésion fibres/matrice et par la rupture en cisaillement de la matrice.

**II.6.1.3.2. Rupture translaminaire en compression:**

Le micro-flambage par compression est le mécanisme principal de ce type de rupture. Les fibres individuelles flambent localement au point où l'instabilité est maximum. Le coude de chaque fibre provoque deux ruptures séparées par une distance de 5 à 10 fois le diamètre de la fibre.

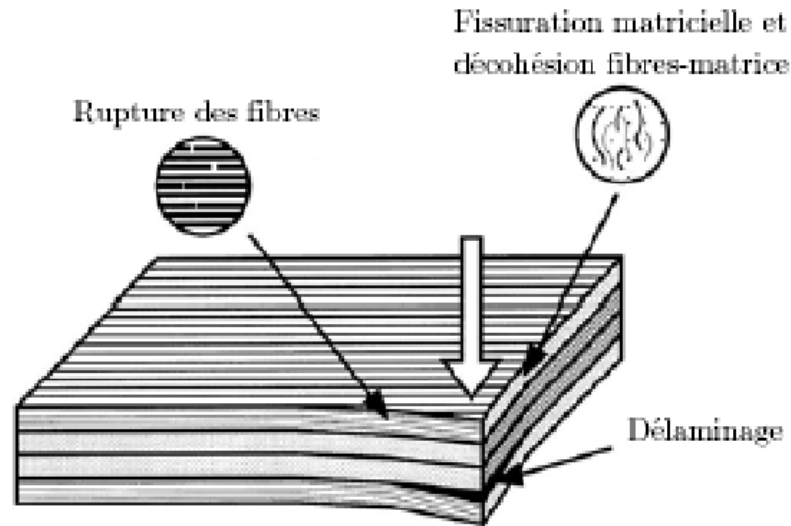
**II.6.2. Les mécanismes d'endommagement dans les stratifiés composites :**

L'hétérogénéité et l'anisotropie des matériaux composites rendent leurs mécanismes d'endommagement nombreux et complexes. Ces endommagements peuvent apparaître très tôt dans la vie d'une structure et constituer des zones d'amorçage de rupture macroscopique fortement préjudiciables à son intégrité. On se propose à présent de mettre en évidence ces différents mécanismes élémentaires amenant la création de surfaces de décohésion au sein des composites stratifiés.

**II.6.3. Développement des mécanismes et processus de rupture:**

La récapitulatif les mécanismes de dégradation présentés précédemment et leurs échelles correspondantes. Outre la nature de la sollicitation appliquée (statique/dynamique, direction, vitesse,...), ces mécanismes sont fortement conditionnés dans leurs types (évolution et cinétique) par les différents paramètres suivants:

- La nature et les propriétés des constituants (en particulier leur mode d'endommagement propre),
- Leur arrangement géométrique (proportion, forme et orientation dans chaque pli, séquence d'empilement),
- L'interaction entre les différentes phases (types d'interfaces notamment),
- Le processus de fabrication (porosité initiale, contraintes résiduelles).



**Figure. II.18** Mécanismes d'endommagement dans les stratifiés



**Chapitre III**  
**Techniques expérimentales**

## Introduction

La caractérisation mécanique des matériaux repose sur l'étude de son comportement vis-à-vis les sollicitations extérieures qui engendrent des contraintes et des déformations. Pour cela, nous avons recouru à un certain nombre d'essais normalisés. Ces derniers permettent de déterminer les grandeurs physiques caractérisant le comportement mécanique des matériaux testés.

### III.1 Matériaux et Matériels Utilisés

L'élaboration de nos échantillons s'est effectuée au niveau de l'entreprise **MARINE AZEFFOUN**.

#### III.1.1. Matériaux

Le matériau considéré dans cette étude est un matériau composite à matrice polyester et fibre de verre unidirectionnel (UD). Le mode d'obtention adopté pour l'élaboration du matériau est le moulage par contact.

##### a) Résine :

La résine utilisée est une résine polyester ortho phtalique de stratification de couleur bleu opaque,



**Figure.III.1** Résine à l'état liquide.



**Figure.III.2** La résine utiliser.

**b) Durcisseur :**

C'est une substance qui augmente la vitesse d'une réaction chimique sans être consommé et sans modifier la position finale de l'équilibre thermodynamique de cette réaction. Le dosage à respecter pour ce catalyseur est de 1 à 2% en masse

**c) Le renfort :**

Dans cette étude nous avons utilisé de fibre de verre comme renfort



**Figure.III.3** Forme de fibres de verre utilisées fibre de 800.

**d) La cire :**

Pour éviter que le matériau composite élaboré ne colle sur le moule, on enduit ce dernier d'une fine couche de cire



**Figure.III.4** La cire utilisée lors du moulage.

### III.1.1.2. Le matériel

#### a) La Balance :

Nous avons utilisé une balance, pour peser nos mélanges.

#### b) Les moules :

Les moules ont été fabriqués au laboratoire des sciences des matériaux de la faculté de génie mécanique pour les besoins de notre travail. Il est constitué d'une plaque de verre 450\*450\*5.un cadre en carton

#### C) Le rouleau :

Utilisé pour bien étaler la résine pendant le moulage



**Figure.III.5** Le rouleau utilisé pour étaler la résine

### III.1.1.3 Etapes suivies pour l'élaboration du matériau à étudiés

Pour la préparation du stratifié, nous avons suivit les étapes mentionnées ci-dessous :

- Préparation du moule et différentes couches de renforts
- Application de la cire
- Versement d'une quantité de la résine avec durcisseur pour le matériau composite sans charges.
- Etalement de la résine à l aide du rouleau
- Superposition des couches de fibres.
- Versement de la dernière couche de la résine bien étalé le résine afin d'avoir la meilleure planéité sur la surface.
- Laisser le matériau composite ainsi élaboré durcir le temps nécessaire
- Le traitement thermique Une partie de nos éprouvettes ont subit un traitement thermique de relaxation à 80°C pendant 8 heures dans une étuve de marque (MEMMERT).



**Figure.III.6** L'étuve MEMMERT

**-pour le découpage et prélèvement des éprouvettes :**

Après un temps de repos de nos plaques de matériaux d'étude, nous avons découpé des éprouvettes normalisées pour l'essai de flexion.

- Le découpage avec une scie électrique équipée d'un disque de diamant.
- Un polissage de l'état de surface des échantillons à l'aide d'une polisseuse.
- Traitement thermique de relaxation à 40°C, pendant 24heures, dans une étuve de marque MAMMERT.
- Numérotation des éprouvettes avec nombre de couche et l'angle.

### **III.2. Techniques de caractérisation**

Pour connaître le comportement mécanique du matériau, on lui fait subir plusieurs test :

- **Microscope optique** : Pour donner une image grandie de notre matériau.
- **Infrarouge** : pour déterminer les fonctions chimiques existants dans le matériau.
- **L'essai de flexion** : nous permet de déterminer le module élastique en flexion et la flèche

- **l'essai de micro dureté :** pour cibler la dureté de chaque constituant de notre matériau composite

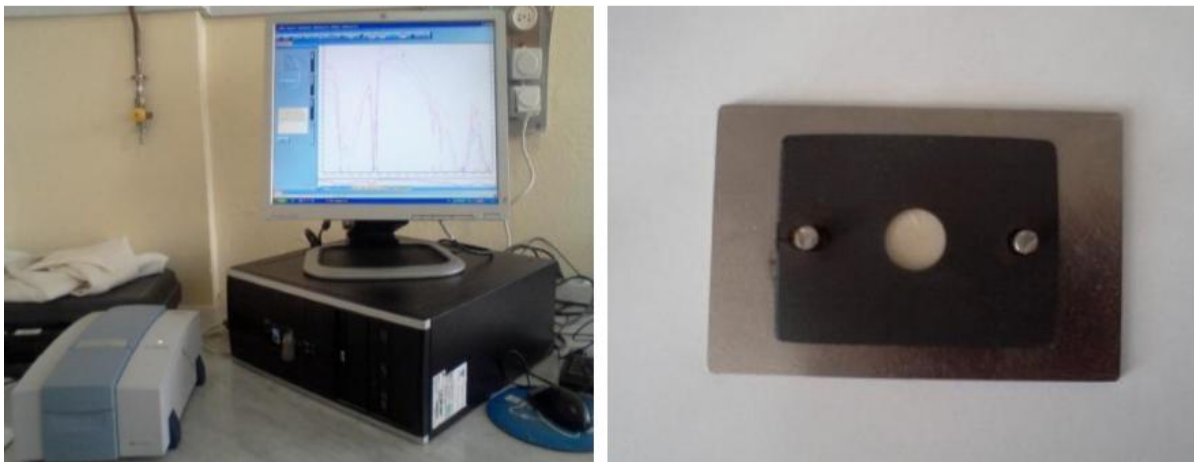
### **III.2.1 Caractérisation physico-chimique**

#### **III.2.1.1 Infra rouge :**

C'est une technique très utilisée en industrie pour l'analyse des pollutions ou le contrôle en ligne des procédés (également pour trier des matériaux en vue du recyclage)

Cette technique permet d'identifier les composés organiques quel que soit leur état (liquide, solide ou gazeux).

Cette technique a connu un renouveau au cours des années 70 avec l'apparition des appareils à transformée de Fourier.

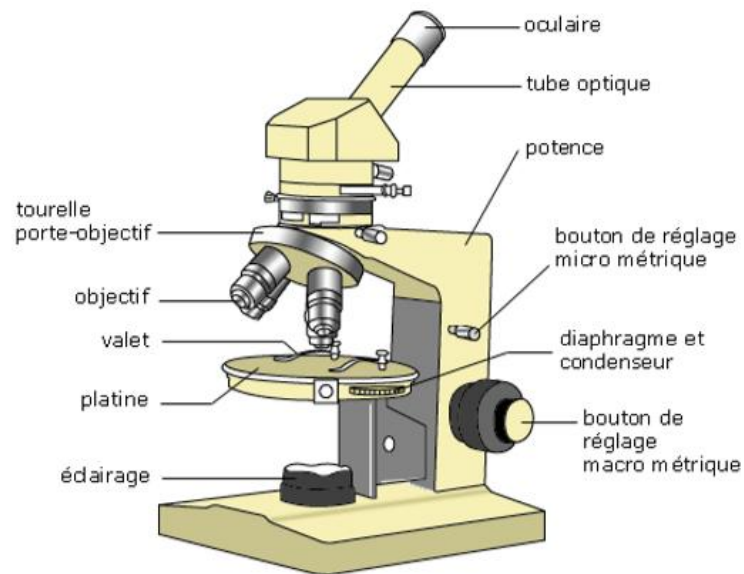


**Figure.III.7** Machine d'analyse infrarouge.

#### **III.2.2.2. Observation à la microscopie optique**

Le microscope est un instrument optique qui donne une image grandie d'un objet. Il est constitué d'un banc optique dont une partie se trouve devant l'objet : l'éclairage, l'autre partie derrière l'objet pour l'observation. Ce banc doit être rigide et posséder tous les organes de centrage des pièces optiques.

L'objet est transformé en une image réelle à l'aide d'un objectif. L'image se forme au plan focal d'un oculaire qui va pouvoir en donner ensuite une image virtuelle située à l'infini. On peut déduire de ce simple schéma que le grossissement de l'appareil dépend non seulement des objectifs et des oculaires mais aussi des distances qui séparent les composants



**Figure.III.8** Schéma d'un microscope optique monoculaire.

#### IV.2.2 caractérisation mécanique

Les essais mécaniques effectués sur les matériaux permettent de caractériser leur comportement lorsqu'ils sont soumis à une ou plusieurs des diverses contraintes qui peuvent s'exercer sur une pièce mécanique lors de sa mise en service. Nous avons utilisés l'essai de flexion et l'essai de microdureté.

##### IV.2.2.1 Essai de flexion trois points

L'essai de flexion est un test mécanique statique qui fait partie de la famille des essais indépendants du temps. La simplicité du montage de l'éprouvette et de sa géométrie, le rend facile à mettre en œuvre. Il nous permet d'extraire la contrainte et la flèche à la rupture ainsi que le module de Young en flexion.

Pour cet essai nous avons utilisé une machine de traction zwick/Roell Z010 (laboratoire Boumerdes, **Figure III.13**), l'essai s'est déroulé à une température ambiante.

**Tableau.III.1** : dimensions (en mm) des éprouvettes de flexion trois points, selon **ISO 14125**.

Longueur l	Distance entre appuis L	Largeur B	Epaisseur h
100	80	15	4

**Figure.III.9** Machine de flexion trois points.



**Figure.III.10** Eprouvettes de flexion.

L'essai de flexion à trois points permet de déterminer :

- Contrainte à rupture de flexion  $\sigma_r$  :

$$\sigma_r = \frac{3 L F_r}{2 b h^2}$$

- La déformation à rupture en flexion :

$$\varepsilon_r = \frac{6 Y_r h}{L^2}$$

- Le module d'élasticité de flexion  $E_f$  :

$$E_f = \frac{L^3}{4 b h^3} \frac{F_r}{Y_r}$$

Avec :

$F_r$  : Charge à la rupture en newton (N).

$Y_r$  : La flèche en en mm.

$L$  : Portée en mm.

$b$  : Largeur de l'éprouvette en mm.

$h$  : Hauteur de l'éprouvette en mm.

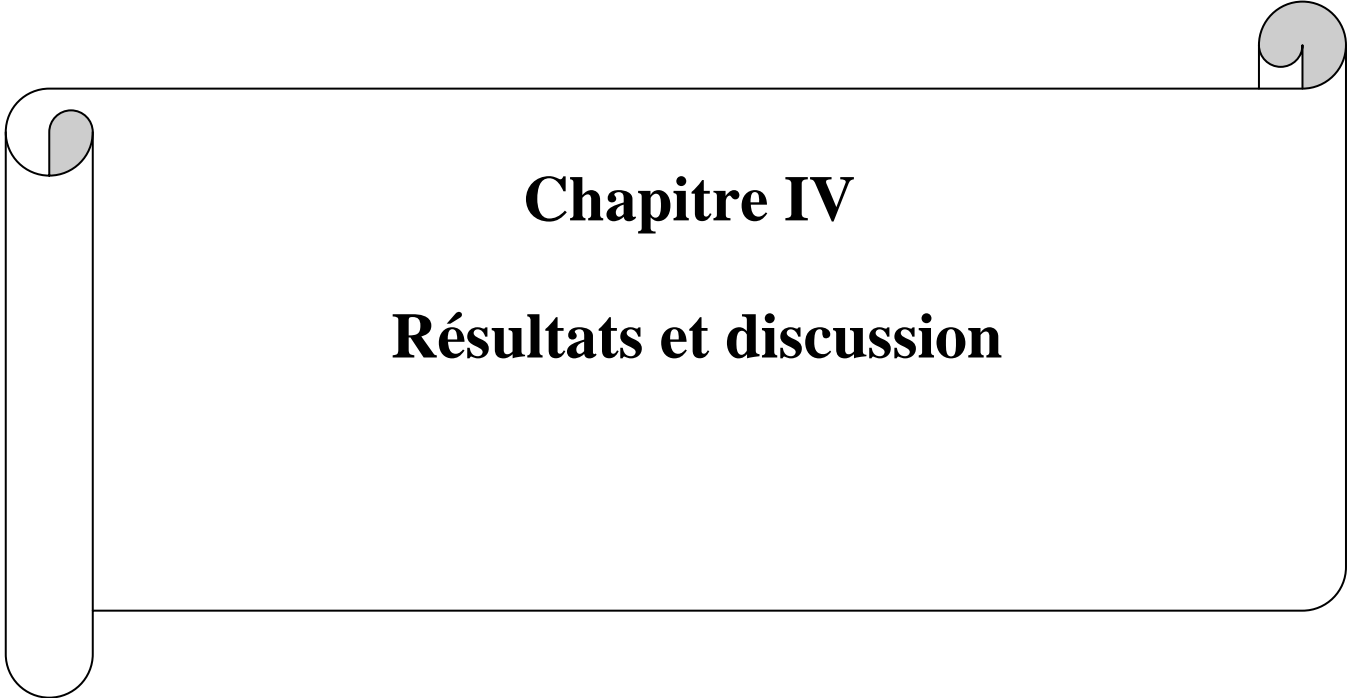
**III.2.2.2 La micro dureté**

L'essai de micro dureté est un essai effectué sous très faible charges ( $F < 0,2$  da N) avec un pénétrateur en diamant de forme pyramidale diamant,. Les empreintes résultantes font quelques microns.

Les essais de micro dureté Vickers sont effectués sur un appareil équipé d'un microscope permettant de localiser la phase à soumettre à l'indentation. De ce fait, lorsque le choix de la charge et la zone à indenter sont réalisés, le pénétrateur se déplace pour cibler la phase voulue et se retire après 20 secondes d'indentation. Une empreinte de forme pyramidale est tracée sur la surface de l'échantillon. La mesure des deux diagonales à l'aide de deux droites permet de calculer la valeur de la micro dureté à l'aide d'un programme placé sur l'appareil.



**Figure.III. 11** Micro duromètre

A decorative graphic of a scroll, rendered in black outlines with grey shading on the inner curves of the top and bottom edges. The scroll is horizontal and occupies the middle section of the page.

# **Chapitre IV**

## **Résultats et discussion**

**Introduction**

Cette partie est consacrée à la présentation et l’analyse de l’ensemble des résultats obtenus de différents composites par l’essai de flexion trois points. En premier lieu, Nous allons présenter les résultats des différents essais expérimentaux réalisés dans le cadre de la présente étude. Par la suite nous avons fait une étude comparative afin de d’évaluer et de comprendre le comportement de nos stratifiés selon certain nombre de paramètres tels que : le nombre de pli, l’orientation du renfort et sollicitation hors axes.

**IV.1.Résultats et discussions**

**IV.1.1. Résultats :**

Dans ce qui suit nous exposons les résultats obtenus suite aux essais de flexion Nous présentons ci dessous les courbes Force/ flèche de nos éprouvettes de flexion pour tout les composites ainsi élaborés

**IV.1.1 Présentation des résultats des essais de flexion des matériaux composites :**

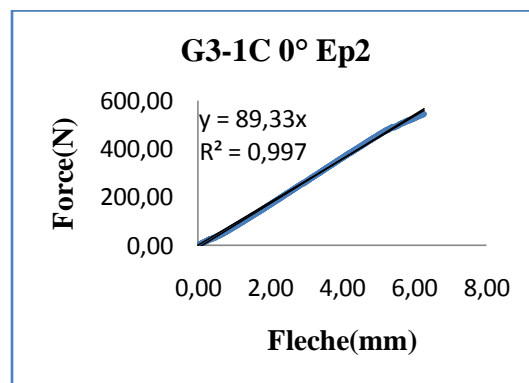
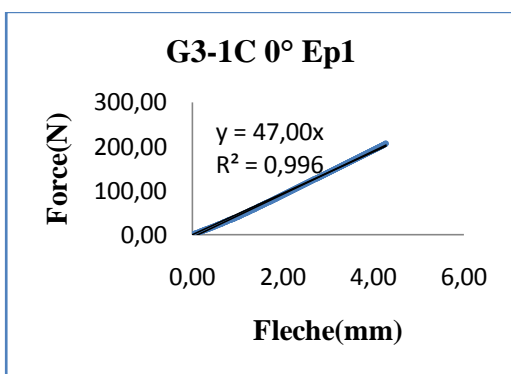
Nous présentons les résultats des essais de flexion pour les éprouvettes.

**IV.1.1. 1.Composites UD en une couche :**

Les tableaux. IV.1-IV.5 rassemblent les résultats de mesure des caractéristiques mécaniques.

**Tableaux.IV.1 :** Caractéristiques des éprouvettes constituées d’une couche UDselon 0°

1 Couche 0°	h [ mm ]	b [ mm ]	Tg(α)	Fr [ N ]	Yr [ mm ]	σr [ N /mm <sup>2</sup> ]	ε [ % ]	Epp[Mpa]
EP1	4.45	14.75	76.68	455.95	6.17	187.32	0.03	7551.27
EP2	5.12	15.25	89.33	545.62	6.28	163.78	0.03	5586.34
<b>Moyenne</b>						175.55	0.03	6568.80



**Figure.IV.1** Courbes forces/flèche d’une seule couche UD 0°.

Tableaux.IV.2 : Caractéristiques des éprouvettes constituées d'une couche UD selon 30°.

1 Couche 30°	h[ mm]	b[ mm]	Tg(α)	Fr[ N]	Yr[ mm]	σr[ N /mm <sup>2</sup> ]	ε[ %]	Epp[Mpa]
EP1	4.90	15.52	52.97	151.02	2.81	48.63	0.01	3713.30

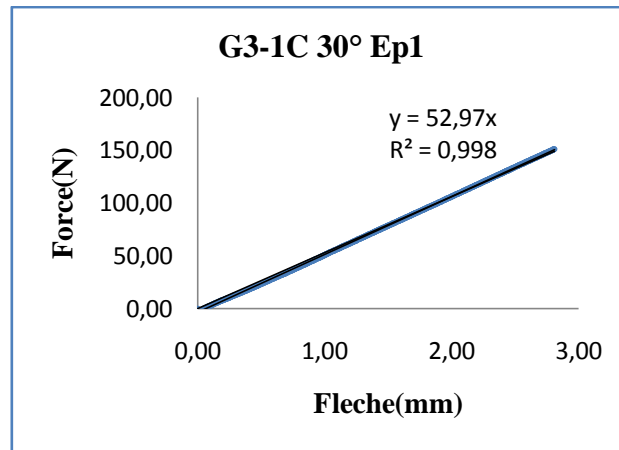


Figure.IV.2 Courbes forces/flèche d'une seule couche UD 30°.

Tableaux. IV.3 : Caractéristiques des éprouvettes constituées d'une couche UD selon 45°

1 Couche 45°	h[ mm]	b[ mm]	Tg(α)	Fr[ N]	Yr[ mm]	σr[ N /mm <sup>2</sup> ]	ε[ %]	Epp[Mpa]
EP1	5.12	15.65	51.94	149.09	2.88	43.61	0.01	3165.10
EP2	5.12	15.65	55.44	255.39	4.63	74.70	0.02	3378.38
Moyenne						59.15	0.015	3271.74

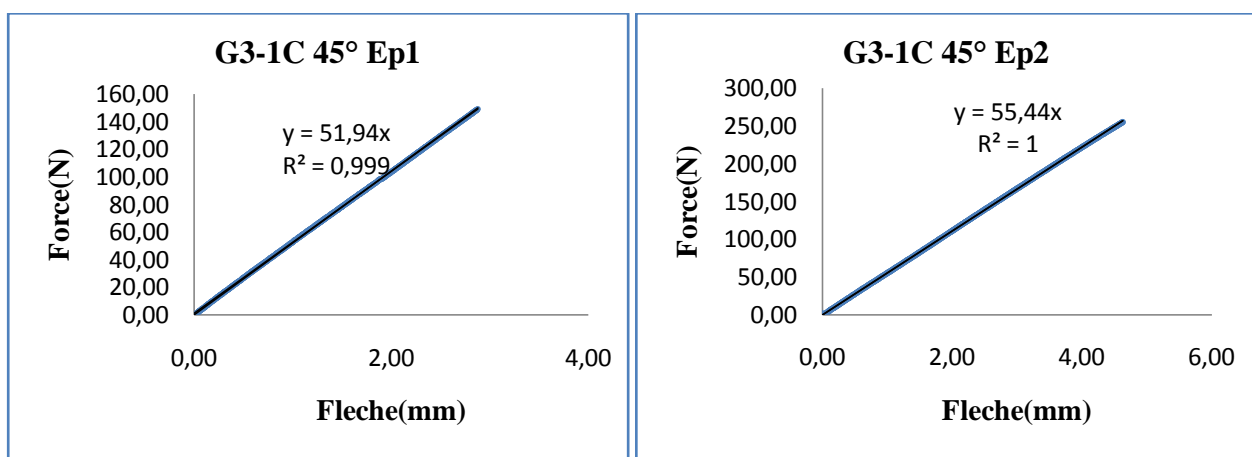


Figure.IV.3 Courbes forces/flèche d'une seule couche UD 45°.

Tableaux. IV.4 : Caractéristiques des éprouvettes constituées d'une couche UDselon 60°

1 Couche 60°	h[ mm]	b[ mm]	Tg(α)	Fr[ N]	Yr[ mm]	σr[ N /mm <sup>2</sup> ]	ε[ %]	Epp[Mpa]
EP1	5.1	15.01	49.67	167.44	3.39	51.47	0.02	3193.10
EP2	5.1	15.01	61.59	166.75	2.72	51.25	0.01	3959.40
EP3	5.1	15.01	59.14	201.08	3.42	61.81	0.02	3801.89
<b>Moyenne</b>						54.84	0.016	3651.46

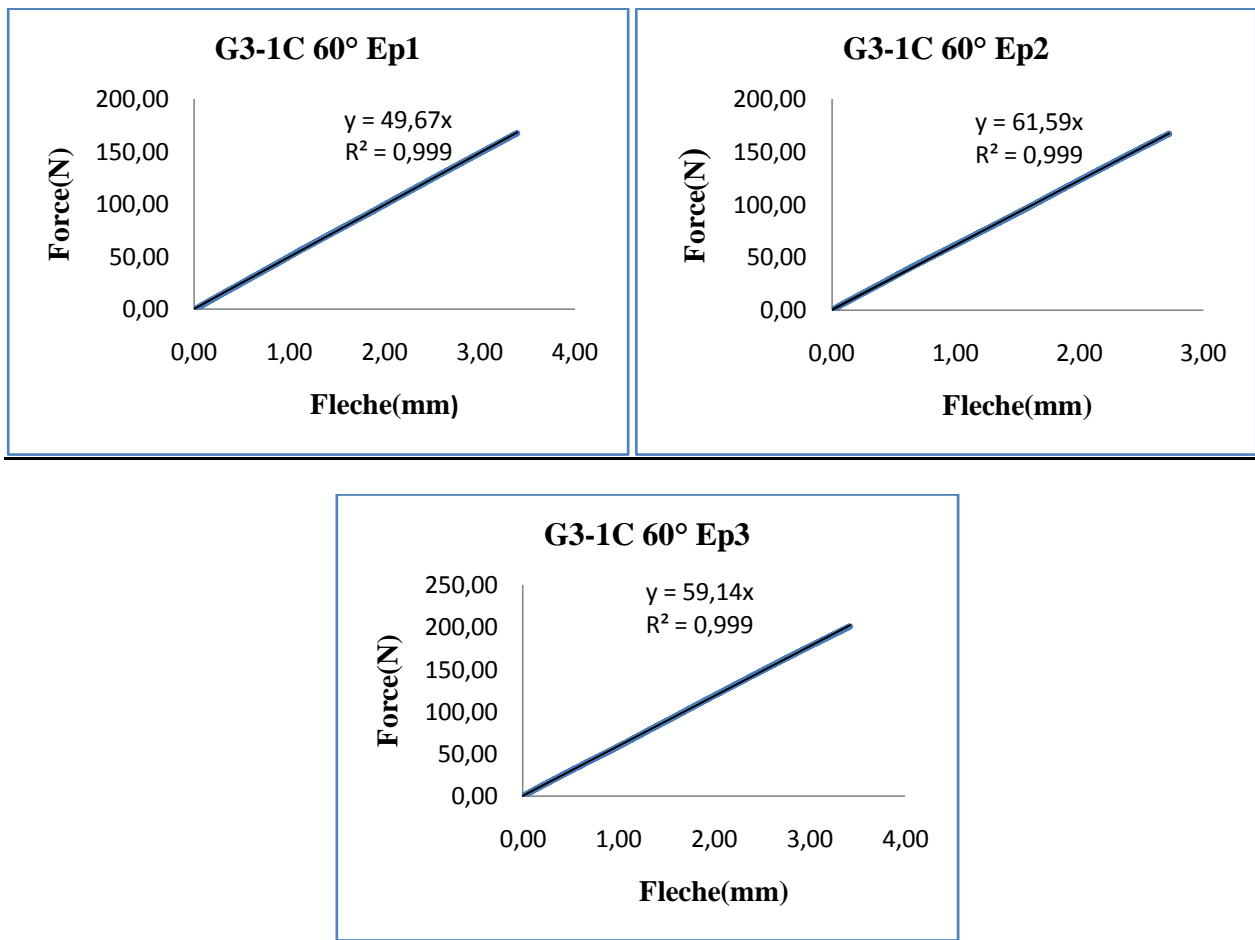


Figure. IV.4 Courbes force/flèche d'une seule couche UD 60°.

Tableaux. IV.5 : Caractéristiques des éprouvettes constituées d'une couche UDselon 90°

1 Couche 90°	h[ mm]	b[ mm]	Tg(α)	Fr[ N]	Yr[ mm]	σr[ N /mm <sup>2</sup> ]	ε[ %]	Epp[Mpa]
EP1	4.85	15.29	47.00	206.57	4.27	68.92	0.02	3448.86
EP2	4.85	15.29	53.63	261.97	4.87	87.41	0.02	3938.30
<b>Moyenne</b>						78.165	0.02	3693.58

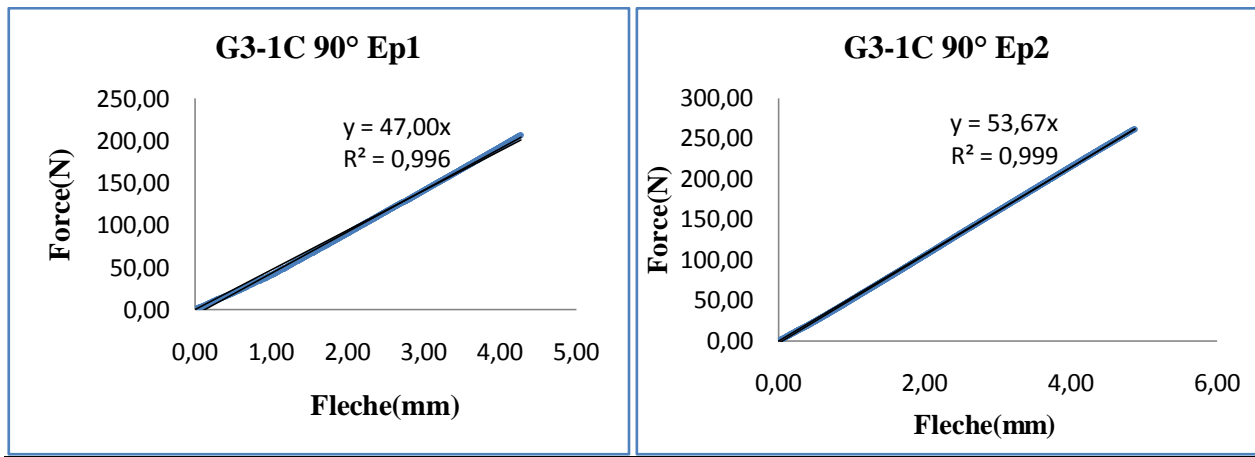


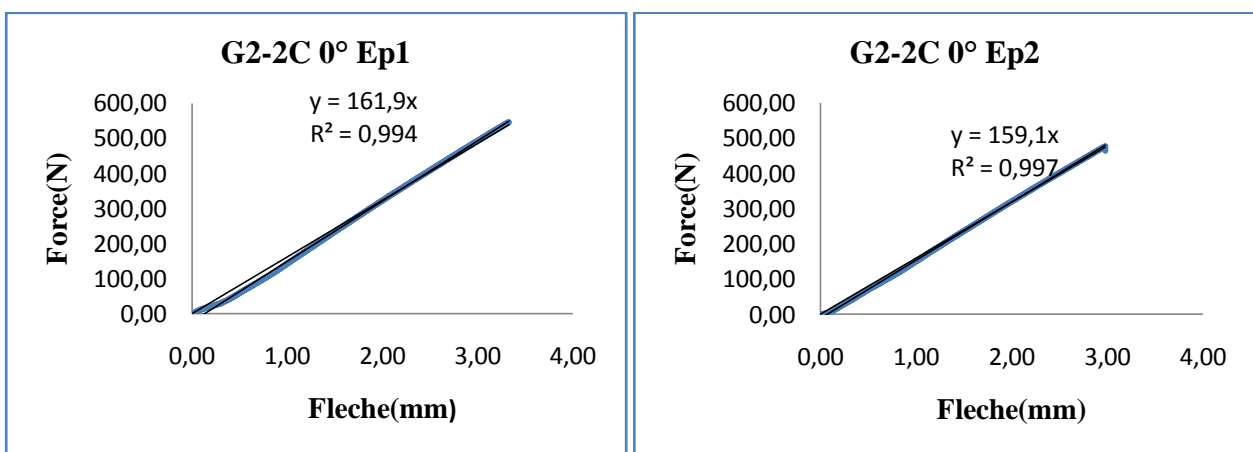
Figure. IV.5 Courbes forces/flèche d’une seule couche UD 90°.

2.1. 2.Composites UD en deux couches

Les tableaux. IV.6-IV.10 rassemblent les résultats de mesure des caractéristiques mécaniques.

Tableaux. IV.6 : Caractéristiques des éprouvettes constituées de deux couches UD selon 0°

2 Couches 0°	h[ mm]	b[ mm]	Tg(α)	Fr[ N]	Yr[ mm]	σr[ N /mm <sup>2</sup> ]	ε[ %]	Epp[Mpa]
EP1	6.02	15.66	161.90	547.12	3.33	115.69	0.02	6065.63
EP2	5.75	15.75	159.10	463.57	2.98	106.83	0.02	6801.36
EP3	5.90	15.60	160.60	592.85	3.69	131.01	0.02	6416.16
Moyenne						117.84	0.02	6 427.71



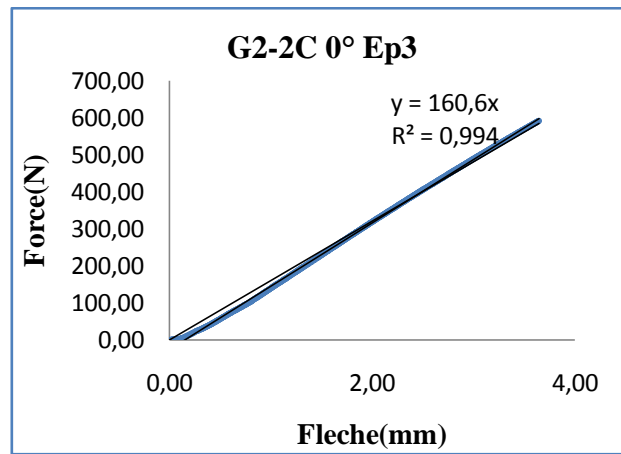
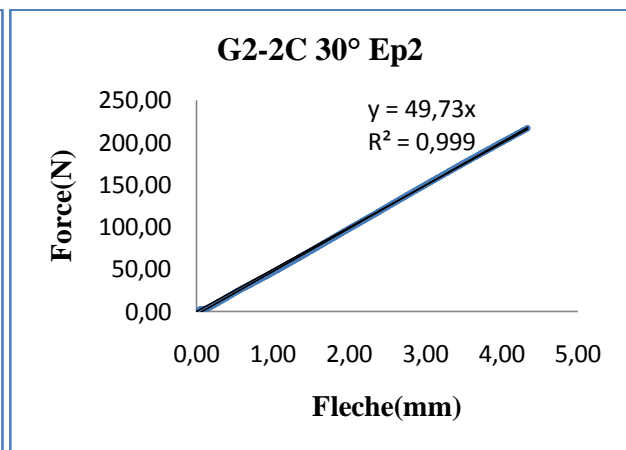
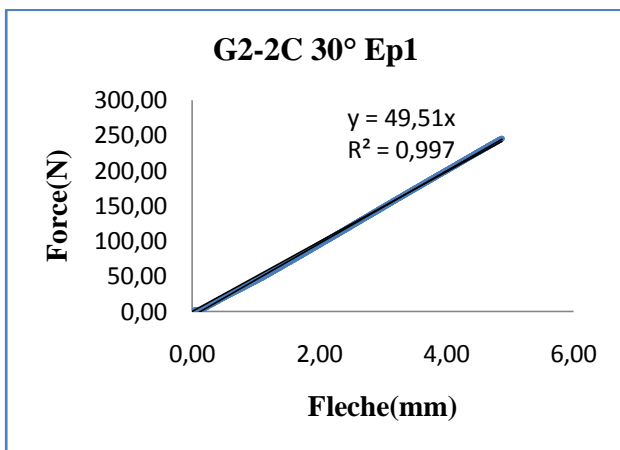


Figure. IV.6 Courbes force/flèche de deux couches UD 0°.

Tableaux. IV.7 : Caractéristiques des éprouvettes constituées de deux couches UD selon 30°

2 Couches 30°	h[ mm]	b[ mm]	Tg(α)	Fr[ N]	Yr[ mm]	σ[ N /mm <sup>2</sup> ]	ε[ %]	Epp[Mpa]
EP1	5.38	15.12	49.51	245.82	4.88	67.40	0.02	2691.56
EP2	5.38	15.12	49.73	217.25	4.35	59.57	0.02	2703.52
EP3	5.38	15.12	46.61	206.61	4.35	56.65	0.02	2533.91
Moyenne						64.20	0.02	2 642.99



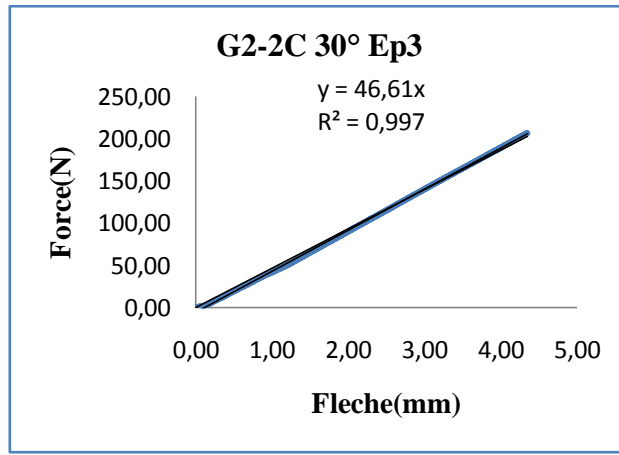


Figure. IV.7 Courbes force/flèche de deux couches UD 30°.

Tableaux. IV.8 : Caractéristiques des éprouvettes constituées de deux couches UD selon 45°

2 Couches 45°	h[ mm]	b[ mm]	Tg(α)	Fr[ N]	Yr[ mm]	σr[ N /mm <sup>2</sup> ]	ε[ %]	Epp[Mpa]
EP1	4.86	15.91	106.7	214.56	2.06	68.52	0.01	7478.17
EP2	5.23	15.91	97.62	363.95	3.88	100.36	0.02	5490.01
EP3	5.68	15.91	85.03	260.63	3.00	60.93	0.02	3733.08
Moyenne						76.60	0.016	5 567.08

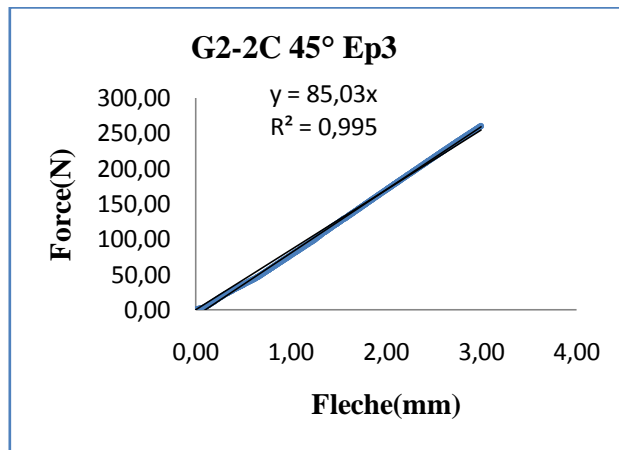
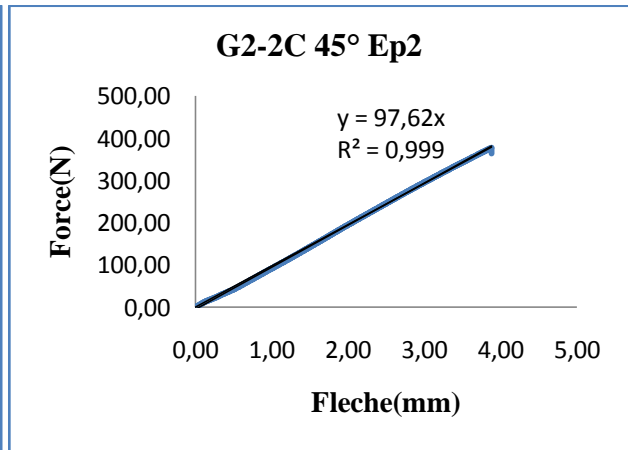
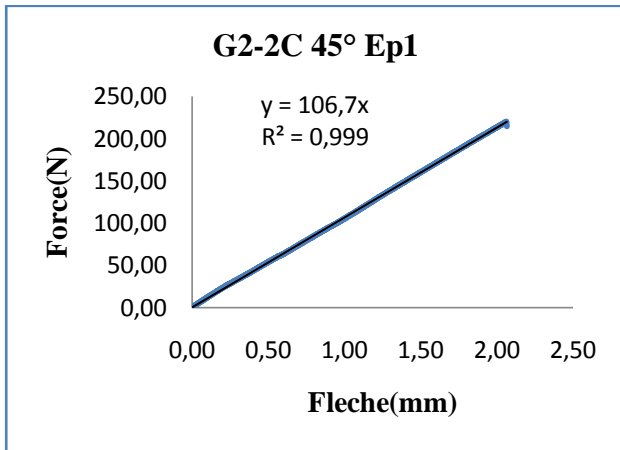


Figure. IV.8 Courbes force/flèche de deux couches UD 45°.

Tableaux. IV.9 : Caractéristiques des éprouvettes constituées de deux couches UD selon 60°

2 Couches 60°	h[ mm]	b[ mm]	Tg(α)	Fr[ N]	Yr[ mm]	σr[ N /mm <sup>2</sup> ]	ε[ %]	Epp[Mpa]
EP1	5.58	14.89	108.4	427.42	4.03	110.63	0.02	5363.42
EP2	5.58	14.89	82.79	213.55	2.75	59.93	0.01	4096.29
Moyenne						85.28	0.015	4 729.85

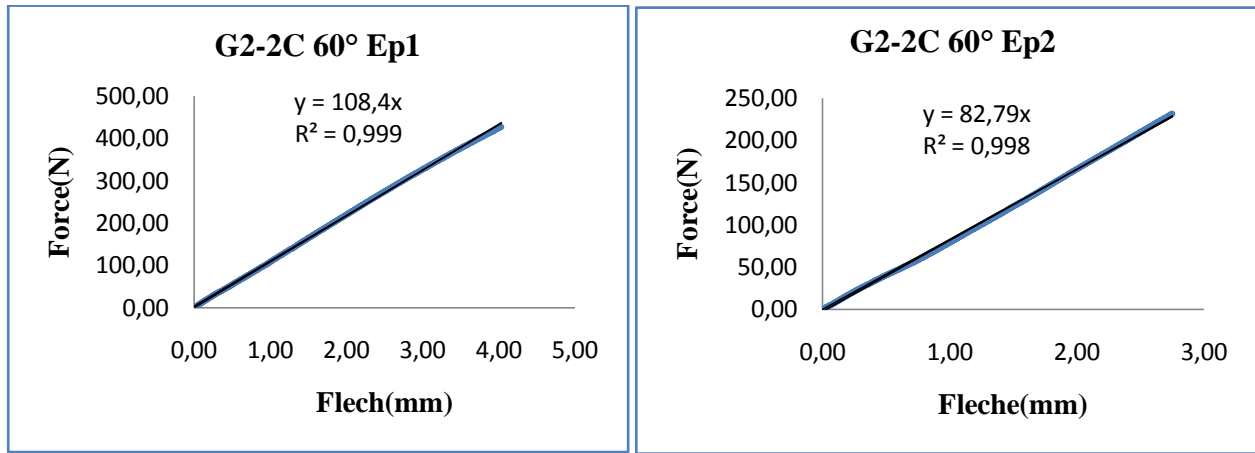
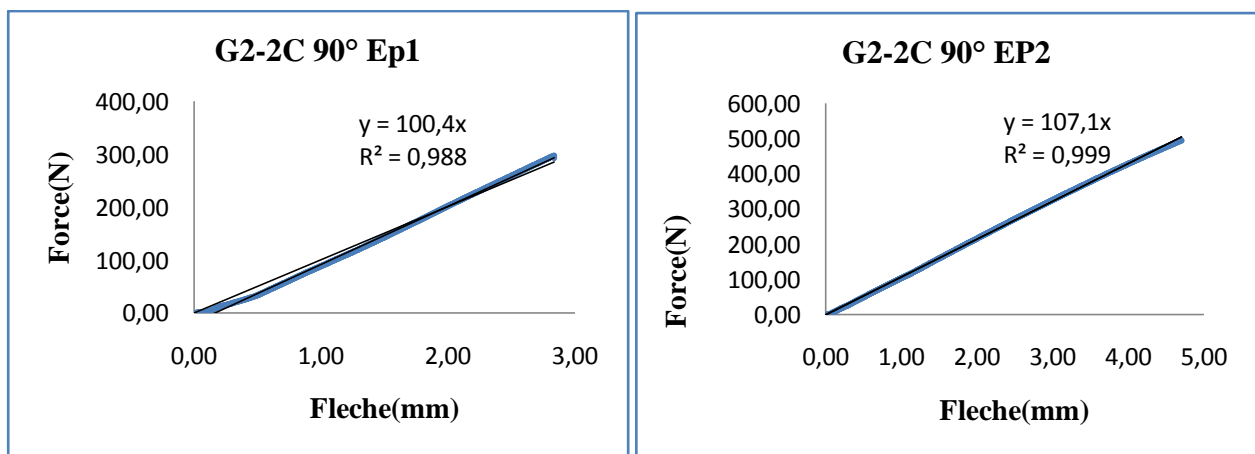


Figure. IV.9 Courbes force/flèche de deux couches UD 0°.

Tableaux. IV.10 : Caractéristiques des éprouvettes constituées de deux couches UD selon 90°

2 Couches 90°	h[ mm]	b[ mm]	Tg(α)	Fr[ N]	Yr[ mm]	σr[ N /mm <sup>2</sup> ]	ε[ %]	Epp[Mpa]
EP1	5.40	15.50	100.4	292.05	2.84	77.54	0.01	5265.39
EP2	5.40	15.50	107.1	494.94	4.70	131.40	0.02	5616.77
EP3	5.40	15.50	92.73	307.64	3.30	81.68	0.02	4863.15
Moyenne						96.87	0.016	5248.43



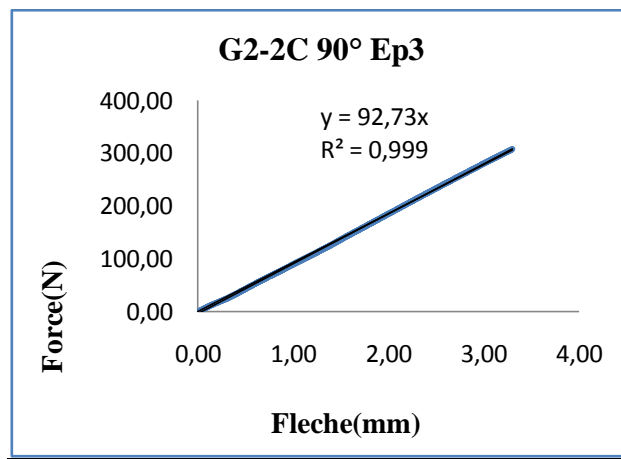


Figure.IV.10 Courbes force/flèche de deux couches UD 90°.

### 2.1. 3.Composites UD en trois couches

Les tableaux. IV.11-IV.12rassemblent les résultats de mesure des caractéristiques mécaniques.

Tableaux IV.11 : Caractéristiques des éprouvettes constituées de trois couches UD selon 0°

3 Couches 0°	h[ mm]	b[ mm]	Tg(α)	Fr[ N]	Yr[ mm]	σr[ N /mm <sup>2</sup> ]	ε[ %]	Epp[Mpa]
EP1	5.40	15.50	152.3	523.39	3.42	138.95	0.01	7987.24
EP2	5.40	15.50	161	350.48	2.06	93.05	0.01	8443.5
<b>Moyenne</b>						<b>116</b>	<b>0.01</b>	<b>8215.37</b>

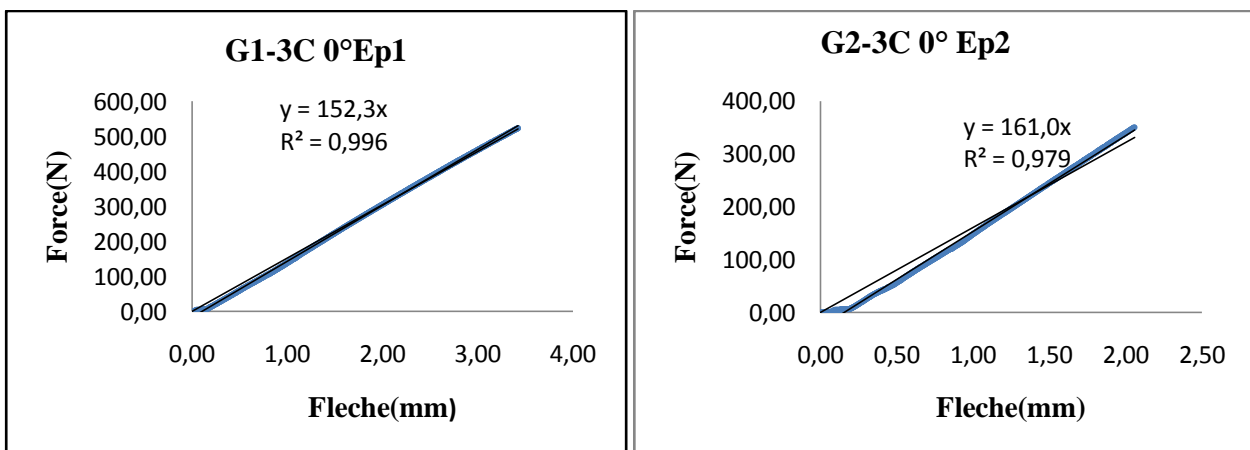


Figure. IV.11 Courbes force/flèche de trois couches UD 0°.

Tableaux. IV.12 : Caractéristiques des éprouvettes constituées de trois couches UD selon 90°

3 Couches90°	h[ mm]	b[ mm]	Tg(α)	Fr[ N]	Yr[ mm]	σr[ N /mm <sup>2</sup> ]	ε[ %]	Epp[Mpa]
EP1	4.26	15.20	101.5	467.29	4.61	133.32	0.02	5873.2

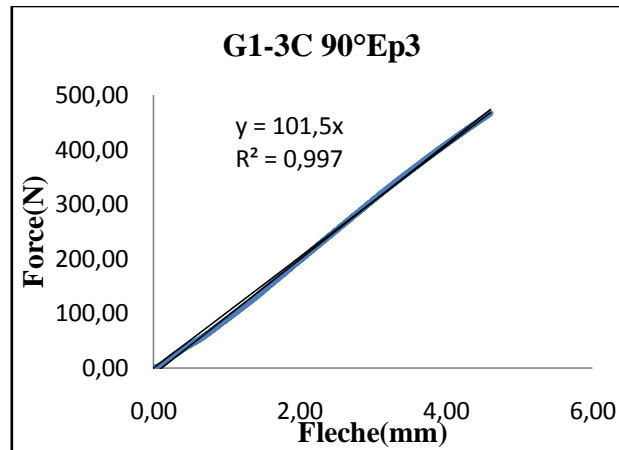


Figure. IV.12 Courbes force/flèche de trois couches UD 90°.

### 2.1. 3.Résine seule

Le tableau IV.13 présente les résultats des caractéristiques mécaniques obtenus pour la résine seule.

Tableaux. IV.13 : Caractéristiques des éprouvettes en résine seule

Résine seule	h[ mm]	b[ mm]	Tg(α)	Fr[ N]	Yr[ mm]	σr[ N /mm <sup>2</sup> ]	ε[ %]	Epp[Mpa]
EP1	5.50	16 .11	64 .49	178.58	2.75	43.97	0.01	3079.77
EP2	5.25	13.75	52.04	287. 3	5.53	90.97	0.03	3347.86
EP3	5.31	15.25	58.39	222.52	3 .73	62.10	0.02	3273.73
EP4	5.36	15.45	76.68	455.95	6.17	123.27	0.03	4125.23
EP5	5.29	15.30	56.19	251.92	4.41	70.61	0.02	3175.49
Moyenne						78.184	0.022	3400.416

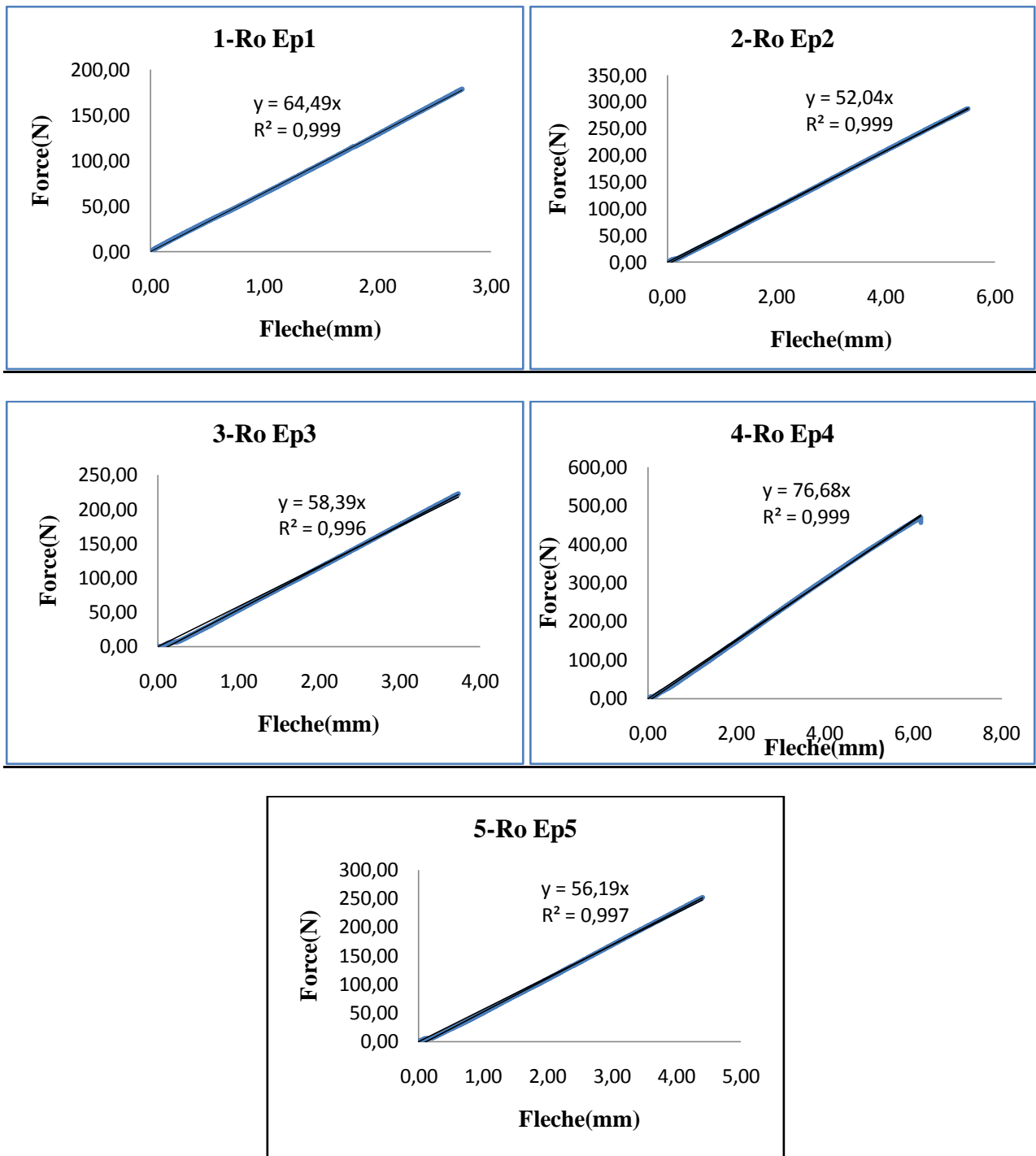
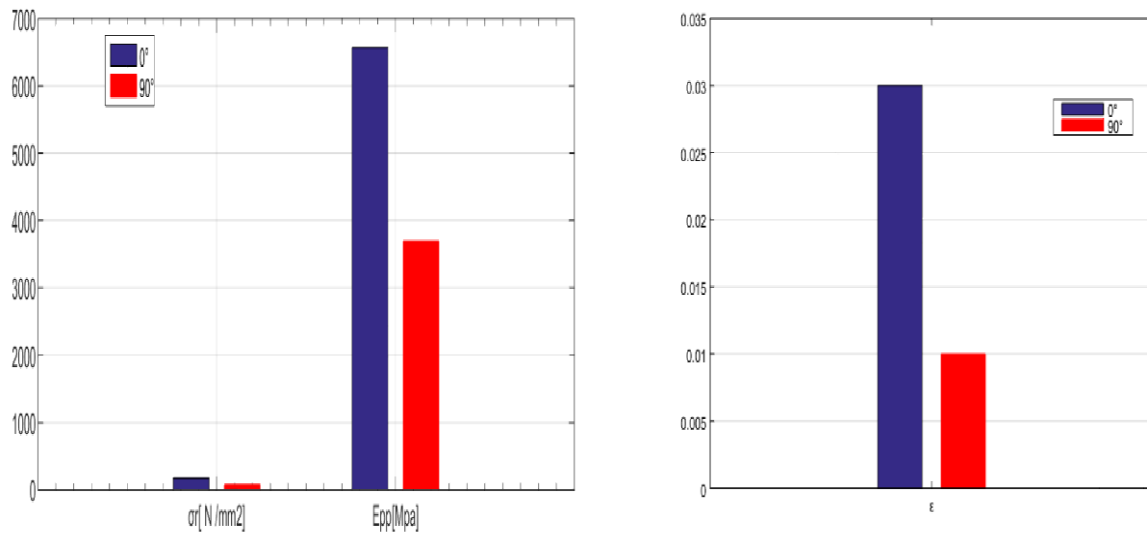


Figure. IV.13 Courbes force/flèche de résine seule

## IV.1.2. Discussions

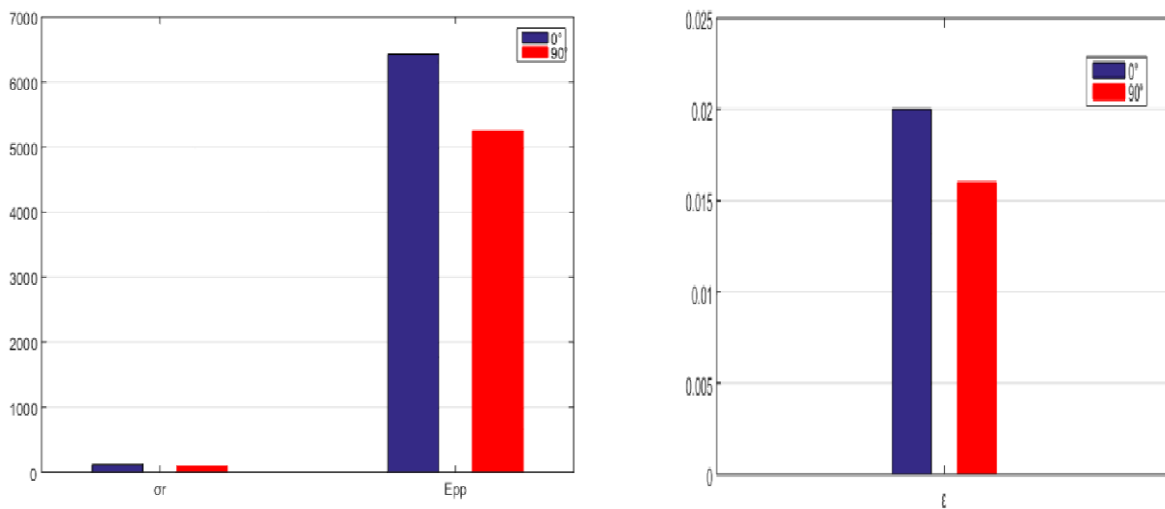
### IV.1.2.1. Anisotropie

Les figures 1-3 présentent les caractéristiques mécaniques des différents matériaux constitués d'une, deux et trois couches de fibres de verre UD.



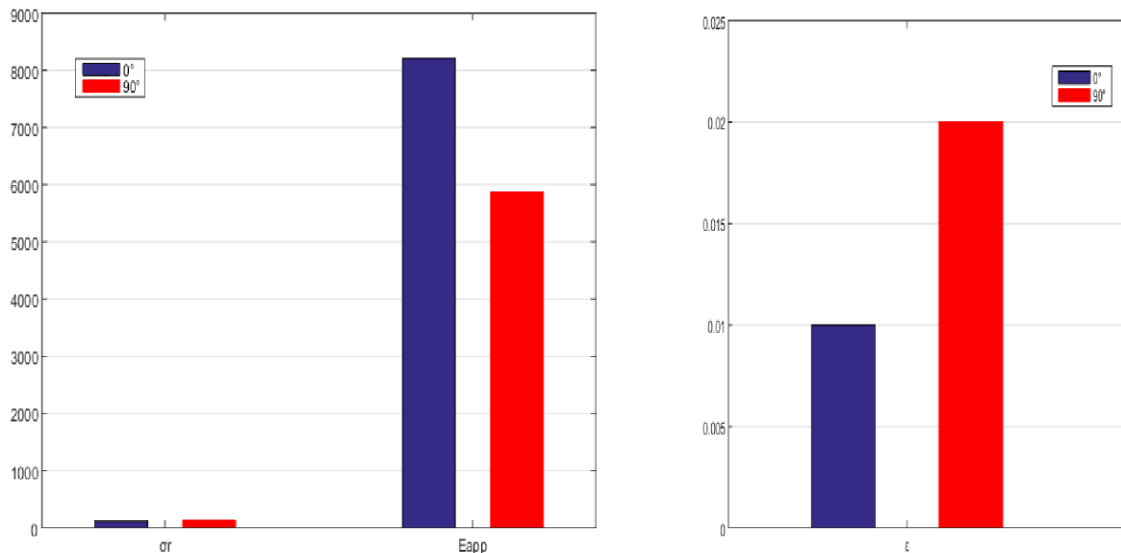
**Figure. IV.14.** Présentation comparative des propriétés mécanique du composite constitué d’une couche en UD.

Nous constatons, d’après la figure IV. 14. que les caractéristiques mécanique de composite constitué d’une couche UD à 0° sont importantes par rapport à celles de 90°.



**Figure.IV.15.** Présentation comparative des propriétés mécanique du composite constitué de deux couches en UD

Nous constatons, d’après la figure IV.15. que les caractéristiques mécanique de composite constitué de deux couches UD à 0° sont importantes par rapport à celles de 90°.



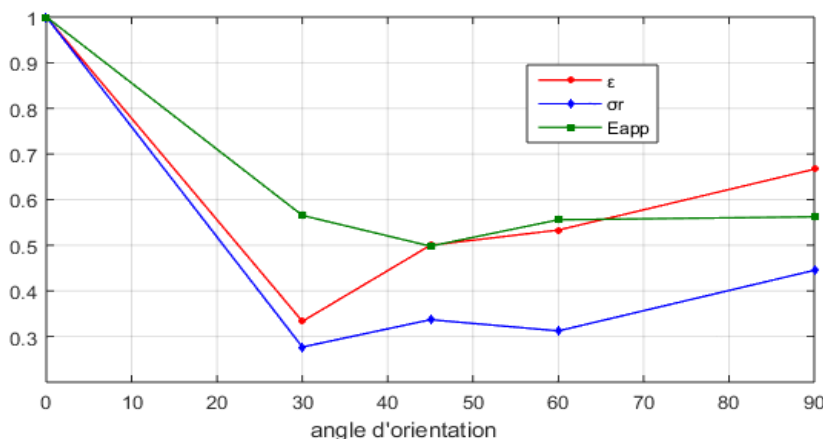
**Figure. IV.16.** Présentation comparative des propriétés mécanique du composite constitué de trois couches en UD

Nous constatons, d’après la figure IV.16 que les caractéristiques mécaniques, contraintes à rupture et la déformation de composite constitué de trois couches UD à 0° sont plus faibles que celles de 90°, mais pour le module apparent de à 0° est important que celui à 90°.

**IV.1.2.2. 2.Selon l’angle de coupe**

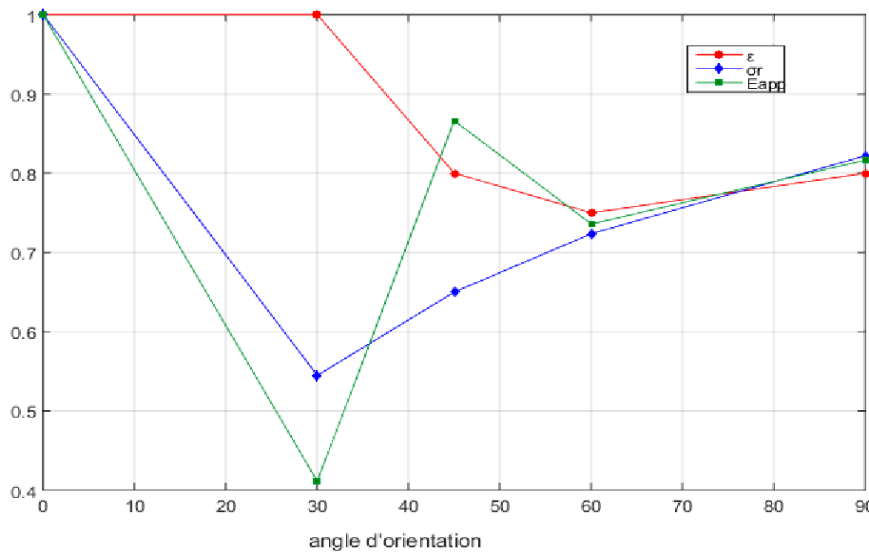
**Tableaux. IV.14 :** Caractéristiques des composites UD .

		0°	30°	45°	60°	90°
1 couche	$\epsilon$ [%]	0.03	0.01	0.015	0.016	0.02
	$\sigma_r$ [ N /mm <sup>2</sup> ]	175.55	48.63	59.15	54.84	78.165
	$E_{pp}$ [Mpa]	6568.80	3713.30	3271.74	3651.46	3693.58
2couches	$\epsilon$ [%]	0.02	0.02	0.016	0.015	0.016
	$\sigma_r$ [ N /mm <sup>2</sup> ]	117.84	64.20	76.60	85.28	96.87
	$E_{pp}$ [Mpa]	6427.71	2642.99	5567.08	4729.85	5248.43



**Figure. IV.17.** Présentation de la variation des propriétés mécanique du composite constitué d’une couche en UD en fonction de l’angle de coupe.

L'évolution adimensionnelle des caractéristiques mécaniques en fonction d'angle d'orientation de la figure IV.17. d'une seule couche, montre que toutes les propriétés mécanique diminue de 0° jusqu'à 30°, puis une augmentation des caractéristiques mécaniques avec l'augmentation d'angle d'orientation de 30° jusqu'à 90°.

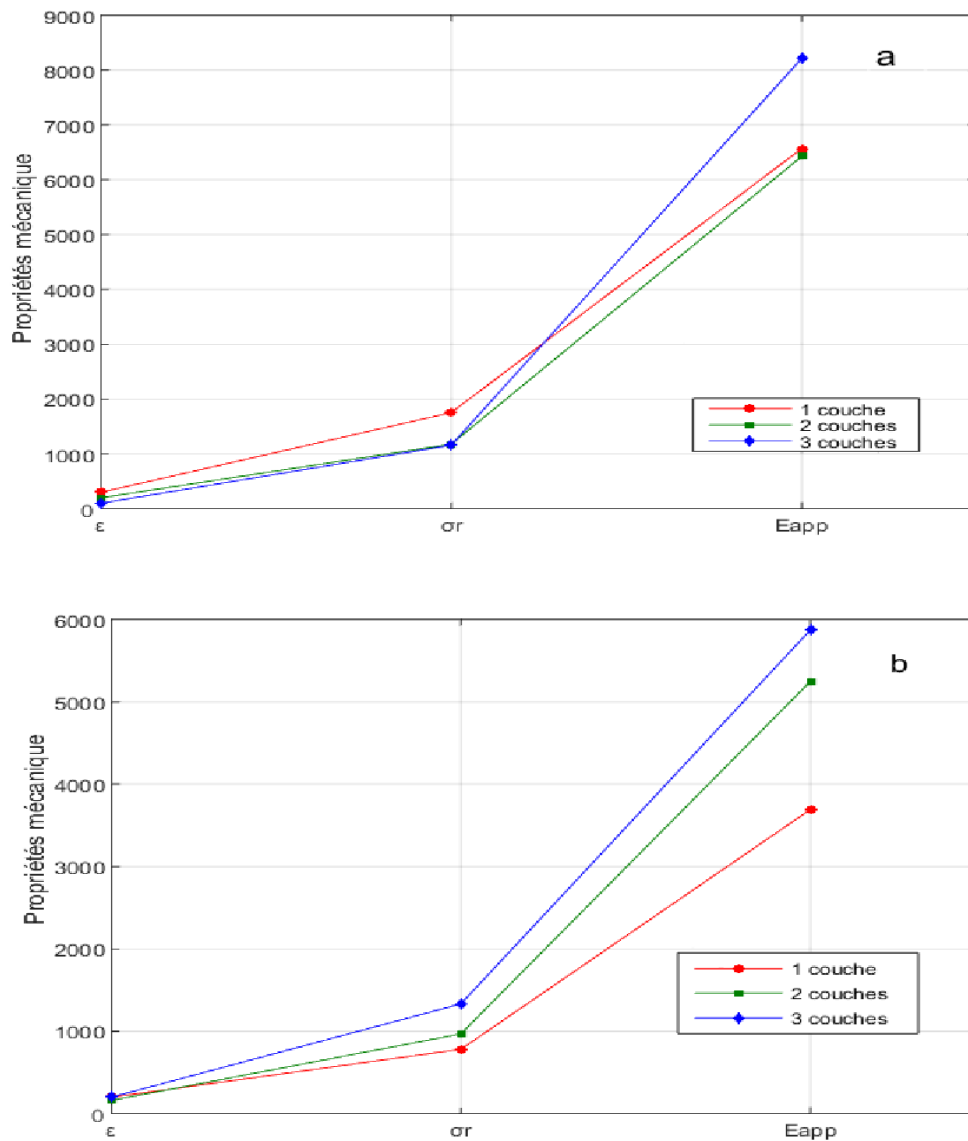


**Figure. IV.18.** Présentation de la variation des propriétés mécaniques du composite constitué de deux couches en UD en fonction de l'angle de coupe

L'évolution adimensionnelle des caractéristiques mécaniques en fonction d'angle d'orientation de la figure IV.18 de deux couches, montre qu'une stabilité de 0° jusqu'à 30° puis une diminution de 30° jusqu'à 60°, pour la déformation et une diminution de contrainte à rupture et module apparent de 0° jusqu'à 30° puis une augmentation jusqu'à 90°.

#### IV.1.2.2. 3.Selon les couches

La figure IV.19.présente les propriétés des matériaux selon deux directions de coupes afin de bien voir la variation des caractéristiques de différents matériaux.

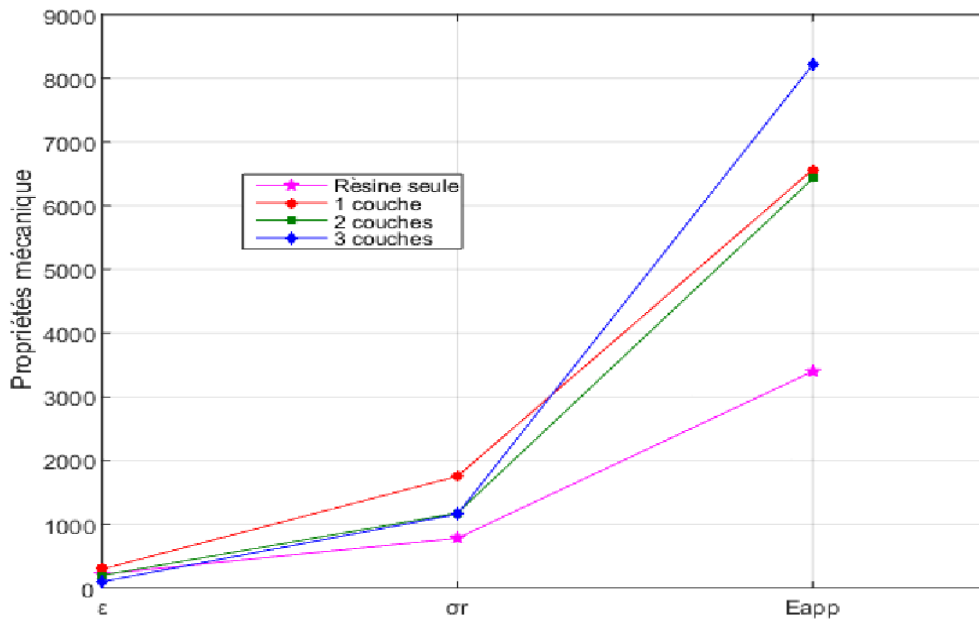


**Figure. IV.19.** La variation des propriétés mécaniques de différents matériaux :a)-0°,b)-90°

L'évolution adimensionnelle des caractéristiques mécaniques en fonction de nombre de couches de la figure IV.19 , pour a)-0° montre que la déformation et la contrainte à rupture de matériau d'une couche supérieure à celles de deux et trois couche et le module apparent de trois couche supérieures à celui d'une et deux couches.

Pour b)-90° montre que les caractéristiques mécanique de trois couche supérieure à celles d'une et de deux couches.

IV.1.2.2. 4. Influence du renforcement des UD



**Figure. IV.20.** Les Proprétés mécanique de différents matériaux.

L'évolution adimensionnelle des caractéristiques mécaniques en fonction de nombre de couches et la résine seule de la figure IV.20, montre que pour la déformation du matériau d'une seule couche supérieure à celui de d'autre matériaux et la résine seule ;

Pour la contrainte à rupture de matériau d'une seule couche supérieure aux autres matériaux et la résine seule contient la plus faible valeur.

Pour le module apparent de matériau de trois couches supérieuresaux autres matériaux et la résine seule contient la plus faible valeur.

## IV.1.2. Présentation des résultats d'infrarouge des matériaux composites non traités :

## IV.1.2.1. Résultats d'infrarouge :

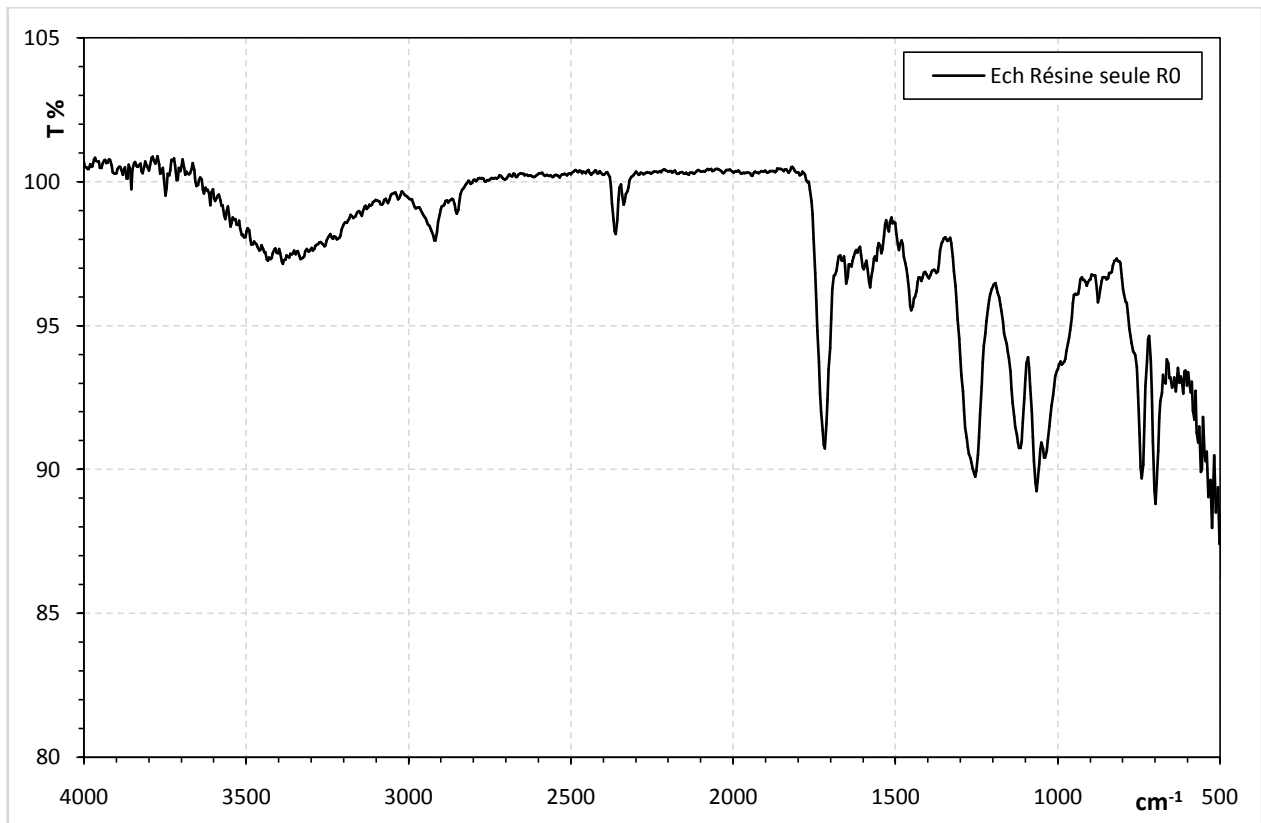


Figure. IV.21 Spectre infrarouge d'échantillon résine seule.

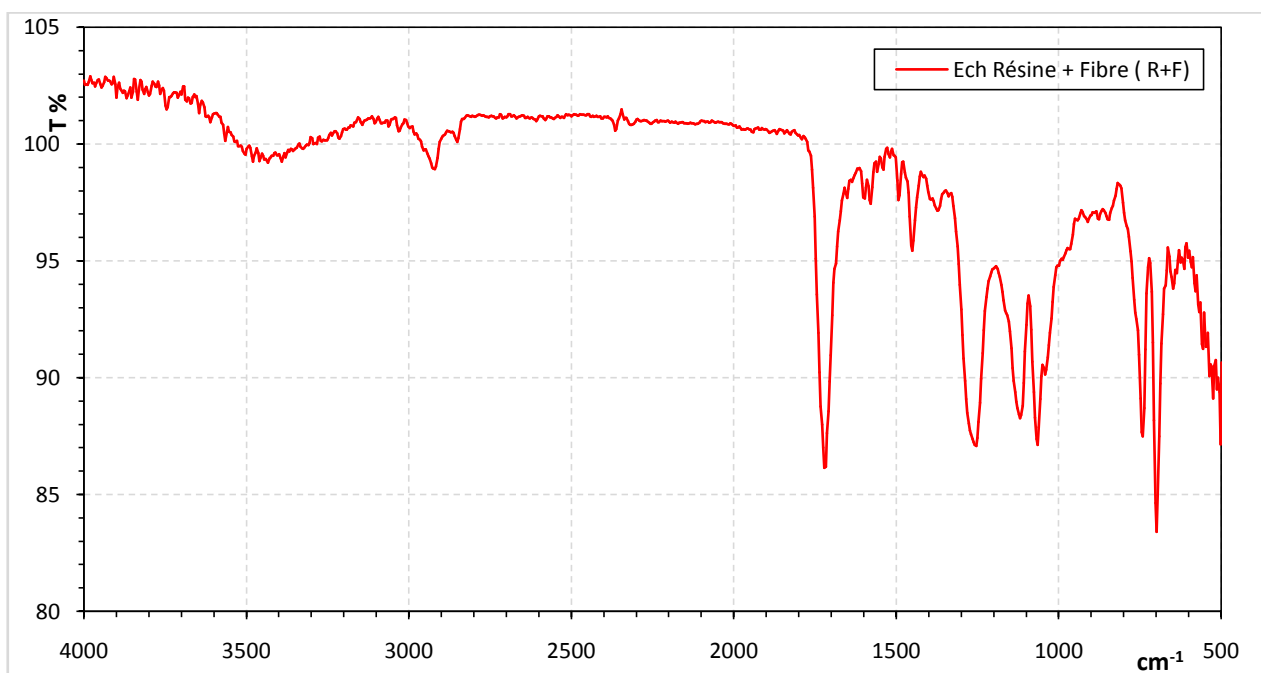
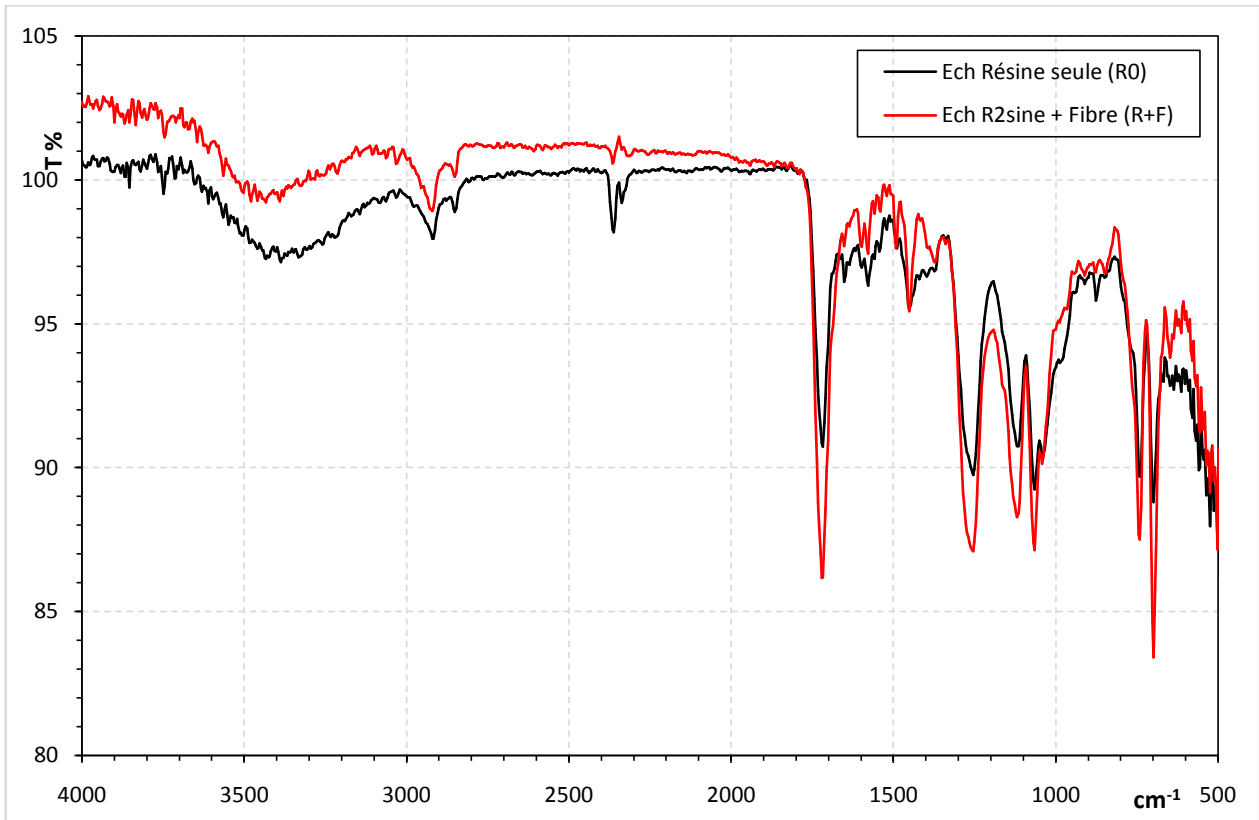


Figure. IV.22 Spectre infrarouge d'échantillon matériau composite (Résine + fibre).



**Figure. IV.23** Spectre infrarouge d'échantillons résine seule et matériau composite assemblés.



## **Conclusion générale et perspectives**

## Conclusion générale et perspectives

---

L'objectif de notre travail est axé en premier lieu sur l'influence de différentes orientations de fibres unidirectionnelles sur le comportement mécanique, où nous avons mené des essais sur des éprouvettes découpées avec des angles différents ( $0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ ) par rapport à la direction du renfort. Deuxièmement, nous nous sommes intéressés à l'effet du nombre des plis sur la variation des caractéristique d'usage des stratifiés. Les résultats obtenus montrent que le nombre des plis, l'orientation, et le type d'empilement ont une influence importante sur le comportement des composites et modifier leur résistance. De plus, les sollicitations hors-axes permettent bien d'identifier les mécanismes de rupture pouvant se produire dans des structures en service. Les principales conclusions de cette étude sont les suivantes :

- Les comportements mécaniques expérimentaux obtenus sont linéaires élastiques avec une dispersion des résultats a été observée pour les valeurs des contraintes à la rupture et des modules d'élasticité. Elle est liée principalement au mode de mise en œuvre des stratifiés.

- La comparaison des résultats de résine polyester seule avec celle des stratifiés renforcés par des fibres de verre montre que le rôle du renfort est d'assurer la fonction de résistance mécanique aux efforts et quant à la matrice, elle assure la cohésion entre les renforts de manière à répartir les sollicitations mécaniques.

-Il a été constaté que l'arrangement des fibres et leur orientation permettent de renforcer les propriétés mécaniques de la structure. Pour le pli unidirectionnel UD son comportement est très différent suivant les directions des fibres : élastique fragile (sens fibre).

-Concernant l'analyse physico-chimique par Spectroscopie Infra Rouge à Transformée de Fourier, nous avons constaté que le renforcement par des fibres de verre unidirectionnelles n'a apporté aucune modification au spectre de la résine seule. Et la transmittance dans le cas du matériau composite est supérieure à celle de la résine seule.

Le stratifié reste complexe dans son comportement vu qu'il est constitué de plusieurs couches successives de nature différente et que le choix de la nature de la résine ou du renfort est choisie en fonction de l'application finale visée. Les propriétés mécaniques de l'interface entre fibres et matrice sont très importantes dans la réalisation d'une structure composite. En effet, il ne doit y avoir ni glissement ni séparation entre les différentes phases de la structure pour obtenir de bonnes caractéristiques mécaniques élastiques.

## **Conclusion générale et perspectives**

---

En perspectives, le travail qui a été présenté dans ce manuscrit peut être enrichi et développé encore plus. Il serait très intéressant :

- D'étudier la sensibilité des stratifiés par rapport à l'orientation de couches et d'identifier les mécanismes d'endommagement.
- D'étudier l'influence de la vitesse de sollicitations sur le comportement des stratifiés.
- Faire des essais de choc pour mieux comprendre les mécanismes de rupture engendrés.
- Il serait intéressant de poursuivre l'étude en introduisant des renforts tissés.
- Développer une analyse de calculs des stratifiées afin de prédire le comportement de divers stratifiés avec différentes séquences d'empilement.



**Références bibliographiques**

## Références bibliographiques :

- [1] Pierre Jaquinet, Utilisation des matériaux composites, Edition Hermès, Paris, 1991.
- [2] Djebbloun Youcef, Etude de la rupture en MODE I d'ouverture des matériaux composites, Université de Biskra (2004).
- [3] Jean Marie Berthelot, Matériaux composites, comportement mécanique et Analyse des structures, 4<sup>ème</sup> Edition, Lavoisier 2005.
- [4] Jean Paul Bailon et Jean Marie Dorlot, Des Matériaux, 3<sup>ème</sup> Edition, Ecole de Montréal, 2000.
- [5] Daniel Gay, Matériaux Composites 4<sup>ème</sup> Edition, Hermès 2009.
- [6] Maurice Reyne Technologie des composites Edition HERMES, Paris, 1990.
- [7] Jean Marie Berthelot, Mécanique des Matériaux et structures composites, le Mans, Novembre 2010.
- [8] M. Mezzo Aghiles, Mémoire de Master, Etude d'une sollicitation Hors axes d'un composite unidirectionnelle (verre e/époxyde) : cas de la traction, 2012.
- [9] Dr Errouane Lahouaria, Construction des Navires, septembre 2016.
- [10] : Khedidja HACINI, étude du comportement mécanique en flexion 3 points d'un matériau composite par les éléments finis, mémoire de magistère, université badji mokhtar-annaba. Année 2009. page 17.
- [11] : DR. BRAHIM ATTAF, matériaux composite de l'échelle de la macro au nano, 2015, page 99. [12] : ABDERREZAK GHARBI, analyse des fissurations des matériaux composites et détermination de leur délaminage utilisant des capteurs piézo-électriques, Mémoire magister 2005, université mentouri-constantine, page 51-55.
- [13] : NADIA BAHLOULI, matériaux composites / DESS mécanique avancée et stratégie industrielle, IPST-ULP, page 9, 40,43. mécanique de poutre composite, mémoire de magister 29-04-2010, université Mentouri-constantine, page 13.
- [14] : DR. BRAHIM ATTAF, matériaux composite de l'échelle de la macro au nano, 2015, page 99.
- [15] : www.technologue pro.com, ISET, cours comportement des matériaux composites chapitre 4 page 74-78. 22, 24, 33,34. 2016
- [16] : marc François, modul 227matériaux non métalliques, université paris-sud 11, IUT de chachan page : 22, 24, 33,34

[17] : CLAUDE BATHIAS ET COLL, matériaux composites, architecture, mise en œuvre, propriétés et application industrielles 2 édition dunod, l'usine nouvelle, ISBN 978-2-10-059697-3, page 205-210, janvier 2013.

[18] : D. ROUBY, propriété mécanique des composites dans la pratique des essais, introduction aux matériaux composites, novembre 2006 page 5, 6, 7.

[19] : Daniel Gay, matériaux composites 5 édition révisée hermes-science, Lavoisier 2005, ISBN 2-74621098-3, page 107-113

[20] : Rokbi mansour, Etude de comportement mécanique du stratifié polyester-fibre de verre, thèse 31/05/2012, page 14 15 18 19