

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**



**Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou**

**FACULTE DE GENIE DE LA CONSTRUCTION**  
**Département de Génie Mécanique**



# **Mémoire de fin d'étude**

**En vue de l'obtention du diplôme**  
**Master académique en Génie Mécanique**

**Option : Génie des Matériaux**

**THEME :**

**Influence de la charge particule de cuivre et du renfort  
couches de fibres de verre sur le comportement  
mécanique d'un composite**

**Proposé et dirigé par**  
**Mme. MOHELLEBI FADHILA**

**Présenté par :**  
**Mr. METTOUCHI LOTFI**

**Co-encadreur :**  
**Mr. MOHELLEBI MOULOUD**

## **REMERCIEMENTS**

*Je remercie en premier lieu le Bon Dieu de m'avoir donné le courage d'aller au bout de mon objectif.*

*Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mes parents et toute ma famille, qui grâce à leurs aides, mon travail a vu le jour.*

*Je remercie profondément ma promotrice Madame MOHELLEBI F, d'avoir accepté de diriger mon travail, par son soutien et ses conseils pertinents qui m'ont permis de travailler tranquillement.*

*J'adresse mes plus vifs remerciements et reconnaissances à Mr MOHELLEBI M pour sa disponibilité et aide précieuse.*

*Je remercie les membres du jury qui me font l'honneur d'examiner travail.*

*Je remercie les membres des laboratoires de : l'université UMMTO, Laboratoire Matériaux, Procédés et Environnement (Boumerdes) l'EI(AZAZGA), SISCOPLAST(DEM) pour leur aide précieuse.*

*Je remercie les membres de la société SAKOMAS, en particulier son PDG.*

*Je remercie mes camarades de promotion pour leur soutien.*

*Mes sincères remerciements vont à tous mes enseignants.*

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

## *Dédicaces*

*Je remercie le bon Dieu de m'avoir donné courage et volonté  
pour réaliser ce modeste travail.*

*Je dédie ce travail*

*A celle qui m'a donné la vie, le symbole de tendresse, qui s'est sacrifiée  
pour mon bonheur et ma réussite, à ma mère ...*

*A mon père, école de mon enfance, qui a été mon ombre durant toutes les  
années des études, et qui a veillé tout au long de ma vie à m'encourager, à  
me donner l'aide et à me protéger. Que dieu les gardes et les protèges.*

*A Mes frères et sœurs et leurs familles.*

*A la mémoire de mon grand-père et ma grand-mère.*

*A mon grand-père, et mes deux grand-mères*

*A mes oncles, mes tantes à qui je dois beaucoup de respect.*

*A mes amis et amies.*

*A tous ceux qui m'aiment.*

*A tous ceux que j'aime*

*A VOUS ...*

**Lotfi**

# Sommaire

---

<b>Introduction générale .....</b>	<b>01</b>
<b>Chapitre I : Généralités sur les matériaux composites</b>	
I.1. Définition d'un matériau composite.....	03
I.2. Intérêt des matériaux composites .....	03
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 .....	04
I.4.1: Classification des matériaux composites suivant la forme des constituants .....	04
I.4.1.1 : composite à particules .....	04
I.4.1.2 : composites.....	04
I.4.2 : Classification des matériaux composites suivant la nature des constituants .....	05
I.5. Constituants des Matériaux Composites .....	05
I.5.1. Les renforts .....	05
I.5.1.1. Différents types de renfort .....	05
I.5.1.2. Différentes nature de renfort.....	06
I.5.2. Les charges et les additifs .....	09
I.5.2.1. Les charges .....	09
I.5.2.2. Les additifs .....	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.....	12
I.5.3.1.4 : Les matrices céramiques.....	13
I.6. La mise en œuvre des matériaux composites : .....	13
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) .....	15
I.6.5. Enroulement filamentaire (ou bobinage) .....	16
I.7 Architecture du composite.....	16
I.7.1 Les monocouches.....	16
I.7.2. les Sandwichs.....	17
I.7.3. Les stratifiées.....	18
I.8. Caractéristiques des matériaux composites.....	18
I.9 Domaines d'application.....	19
I.10. Les matériaux composites dans la construction navale : .....	20
I.10.1. Introduction : Généralités sur la construction navale.....	20
I.10.2 Activités de la construction navale.....	20
I.10.3. Les matériaux de construction d'un navire.....	21

# Sommaire

---

## **Chapitre II : Comportement mécanique des matériaux composite**

II.1 Propriétés physique et mécaniques des composites .....	26
II.2 Mode d'essais mécaniques .....	27
II.2.1 Essai de traction .....	27
II.2.1.1 : Traction longitudinale.....	28
II.2.1.2: Traction transversale.....	28
II.2.1.3 : Traction hors axe.....	29
II.2.2 Essai de flexion.....	30
II.2.2.1. Essai de flexion trois points.....	30
II.2.2.2 : Principe de l'essai.....	31

## **CHAPITRE III : Techniques Expérimentales**

III.1. Matériaux utilisés .....	34
III.1.1 Résine.....	34
III.1.2 Durcisseur.....	34
III.1.3 La Balance.....	35
III.1.4 Mélangeur.....	35
III.1.5 Les renforts.....	36
III.1.6 Les charges.....	37
III.1.7 La cire.....	37
III.1.8 Le moule.....	37
III.1.9 Le rouleau.....	38
III.1.10 : Etapes suivi pour l'élaboration du matériau à étudié .....	38
III.2. Caractérisation du matériau composite.....	39
III.2.1 Caractérisation physique.....	39
III.2.1.1 Densité.....	39
III.2.1.2 Observation au microscopique optique.....	40
III.2.1.3 Observation au microscopique électronique à balayage.....	40
III.2.1.4 Comparaison entre microscopes optiques et électroniques :.....	42
III.2.2 Caractérisation chimique .....	43
III.2.2.1 Définition de la calcination .....	43
III.2.2.2 Calcul du taux de renfort dans le matériau composite.....	43
III.2.3 Caractérisation mécanique.....	42
III.2.3.1 Essai de traction.....	42
III.2.3.2 Essai de flexion.....	45
III.2.3.2.1 Essai de flexion trois points.....	46
III.2.3.3 Essai de dureté.....	46
III.2.3.3.1 Dureté Vickers.....	46
III.2.3.3.2 La micro dureté.....	47
III.2.3.4 Essai de résilience.....	48

## **Chapitre IV : Résultats et discussions**

IV.1. Eprouvettes élaborées .....	51
IV.2 Résultats de la caractérisation mécanique .....	51

## Sommaire

---

IV.2.1 Résultats des essais de traction .....	51
IV.1.2.1 Analyse des courbes contraintes déformations .....	51
IV.1.1.2 Analyse des modules d'élasticité en traction .....	54
IV.2.2 Résultats des essais de flexion .....	55
IV.1.2.1 Analyse des courbes force flèche en flexion .....	55
IV.2.2.2 Analyse des valeurs des contraintes maximales et des déformations (flèches) .....	59
IV.2.2.2.1 Analyse de la variation de la contrainte maximale .....	59
IV.2.2.2.2 Analyse de la variation de la flèche .....	60
IV.2.3 Résultats des essais de résilience .....	62
IV.2.4 Résultats des essais de dureté .....	63
IV.2.5 Résultats des essais de micro dureté .....	64
IV.3 Résultats de la caractérisation chimique .....	65
IV.3.1 Résultats de la calcination .....	65
IV.3.2 Variation du taux de renfort avec la charge de Cuivre .....	66
IV.4 Résultats de la caractérisation physique .....	67
IV.4.1 Test de densité .....	67
IV.4.2 Observation au microscope optique .....	69
IV.4.2.1 Observation au microscope optique des fibres utilisées.....	69
IV.4.2.2 Observation au microscope optique des surfaces des matériaux composites élaborés.....	69
IV.4.2.3 Observation au microscope optique de la poudre de cuivre .....	71
IV.4.3 Observation au MEB des faciès de rupture .....	71
IV.4.3.1 Observation au MEB des faciès de rupture de l'essai de résilience .....	71
IV.4.3.2 Observation au MEB des faciès de rupture de l'essai de flexion .....	73
<b>Conclusion générale</b> .....	<b>74</b>

**Références**

**Annexes**

# Liste des figures

- Fig. I.1 Schéma illustratif d'un matériau composite  
Fig. I.2 les différentes formes des renforts fibres de verre  
Fig. I.3 principaux matériaux de renforts  
Fig. I.4 Différentes familles de matrice  
Fig. I.5 Procédé de moulage par contact  
Fig. I.6 Moulage par projection simultanée  
Fig. I.7 Injection thermodurcissable BMC  
Fig. I.8 Compression thermodurcissable SMC  
Fig. I.9 Enroulement filamentaire (ou bobinage)  
Fig. I.10 : Pli a renforcement unidirectionnel.  
Fig. I.11 : Constitution d'un sandwich.  
Fig. I.12 : composite stratifié  
Fig. I.13 Construction des navires en bois  
Fig. I.14 Construction des navires en acier  
Fig. I.15 Construction des navires en aluminium  
Fig. I.16 Construction des navires en matériaux composites
- Fig. II.1 traction longitudinale  
Fig. II.2 courbe conventionnelle de traction  
Fig. II.3 traction transversale  
Fig. II.4 Traction hors axes  
Fig. II.5 essai de flexion trois points  
Fig. II.6 courbe de contrainte déformation pour un matériau ductile
- Fig. III.1 résine à l'état liquide  
Fig. III.2 flacon contenant le durcisseur  
Fig. III.3 la balance  
Fig. III.4 mélangeur électrique  
Fig. III.5 Différentes forme de fibres de verre utilisées  
Fig. III.6 la poudre de cuivre utilisé comme charge  
Fig. III.7 la cire utilisée lors du moulage  
Fig. III.8 étapes d'élaboration et d'utilisation du moule  
Fig. III.9 le rouleau utilisé pour étaler la résine  
Fig. III.10 Densimètre  
Fig. III.11 Schéma d'un microscope optique monoculaire  
Fig. III.12 Microscope Electronique à Balayage(MEB)  
Fig. III.13 Les différentes émissions produites lors de l'interaction du faisceau d'électron avec la surface de l'échantillon  
Fig. III.14 Schéma illustrant le principe de fonctionnement du MEB  
Fig. III.15 a) les creusets en céramiques, b) four spécifique pour la calcination  
Fig. III.16 la machine de traction de marque zwick/Roell  
Fig. III.17 Eprouvette de traction  
Fig. III.18 machine de traction IBERTEST  
Fig. III.19 Essai de flexion trois points  
Fig. III.20 Durometre  
Fig. III.21 Micro durometre  
Fig. III.22 Mouton pendule (machine d'essai de résilience)

Fig. IV.1 Courbes contraintes /déformations de l'essai de traction pour différents cas  
Fig. IV.2 Courbes contraintes /déformations : résine renforcée avec toutes les couches de fibre  
essai de traction  
Fig. IV.3 Courbes de tendance pour la détermination du module d'élasticité  
Fig. IV.4 Courbe contraintes déformations Résine seule  
Fig. IV.5 courbe de flexion Résine + mat 100  
Fig. IV.6 courbe de flexion Résine +Fibre mat 600  
Fig. IV.7 courbe de flexion Résine +Fibre tissu  
Fig. IV.8 courbe contraintes déformations Résine +toutes les fibres  
Fig. IV.9 Variation du taux de renfort dans le matériau composite élaboré  
Fig. IV. 10 Variation du taux de renfort dans le matériau composite en fonction du Cu  
Fig. IV. 11 Histogramme de la densité  
Fig. IV.12 : les différentes fibres du renfort (MO)  
Fig. IV.13 Observation de la surface des éprouvettes élaborées (MC+5%Cu)  
Fig. IV.14 observation au microscope optique de la poudre de cuivre.  
Fig. IV. 15 Observation au MEB des faciès de rupture de l'essai de résilience de la résine  
seule  
Fig. IV. 16 Observation au MEB des faciès de rupture de l'essai de résilience de la résine +  
fibre de 100  
Fig. IV. 17 Observation au MEB des faciès de rupture de l'essai de résilience de la résine +  
fibre de 600  
Fig. IV. 18 Observation au MEB des faciès de rupture de l'essai de résilience de la résine +  
tissu  
Fig. IV. 19 Observation au MEB des faciès de rupture de l'essai de flexion de la résine l'essai  
de résilience de la résine + toutes les couches  
Fig. IV. 20 Observation au MEB des faciès de rupture de l'essai de flexion de la résine  
Fig. IV. 21 Observation au MEB des faciès de rupture de l'essai de résilience de la résine  
Fig. IV. 22 Observation au MEB des faciès de rupture de l'essai de résilience de la résine 3  
Fig. IV. 23 Observation au MEB des faciès de rupture de l'essai de résilience de la résine

## Liste des tableaux

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

Tableau I.2 avantages et inconvénient de la fibre du verre E, D et R

Tableau III.1 Fiche technique de la résine

Tableau III.2 différence entre MO et MEB

Tableau III.3 Fiche technique du mouton pendule

Tableau IV.1 Dimensions (en mm) des éprouvettes de traction, selon ISO 527

Tableau IV.2 Valeurs des modules d'élasticité pour les MC élaborés

Tableau IV.3 dimensions (en mm) des éprouvettes de flexion trois points, selon ISO 14125

Tableau IV.4 Résilience des matériaux composites élaborés

Tableau IV.5 Résultat de l'essai de dureté Vickers

Tableau IV.6 Résultat de l'essai de micro dureté Vickers

Tableau IV.7 : Résultats de l'essai de calcination

Tableau IV.8 Résultats de l'essai de densité

# *Introduction*

# Introduction générale

---

Les matériaux composites sont des matériaux à hautes performances mécaniques, façonnables à volonté au gré du concepteur et donc doué d'un potentiel illimité. Ces matériaux se développent aujourd'hui dans pratiquement tous les domaines et sont à l'origine de formidables challenges dans diverses réalisations de haute technologie. Ils sont devenus indispensables pour la construction dans plusieurs domaines comme l'aérospatiale, la construction navale, l'automobile, etc.... Comme leur nom l'indique, ils sont composés de plusieurs constituants qui se présentent principalement en deux phases : la matrice et le renfort. Par ailleurs, les matériaux composites, peuvent être choisis et utilisés en fonction d'impératifs techniques et économiques à satisfaire en agissant principalement sur la nature, la proportion, et la composition des constituants, et également sur le mode d'élaboration.

Les ingénieurs en aéronautique recherchent de plus en plus des matériaux de construction légers, robustes, rigides et capables de résister aux chocs, à l'abrasion et à la corrosion : une combinaison de propriétés assez exceptionnelle. Les matériaux résistants sont souvent relativement denses et une augmentation de la résistance et de la rigidité fait généralement diminuer la résilience.

L'étude du comportement des matériaux composites vis-à-vis de l'environnement et la connaissance de leurs caractéristiques mécaniques nécessite de nouvelles notions et techniques plus au moins complexes par rapport à celle utilisés pour les matériaux conventionnels homogènes et isotropes.

Il est absolument nécessaire, avant de lancer un matériau pour une utilisation dans un domaine donné, de faire une étude sur ce matériau.

Le but de notre projet est l'élaboration d'un matériau composite renforcé et chargé. Nous procéderons ensuite caractérisation mécanique, chimique et physique, dans le but de cerner ses différentes propriétés.

Nous avons élaboré trois monocouches en résine polyester renforcée respectivement : pour le premier en fibre de verre sous forme de mat 100, le second en fibre de verre mat 600 et le troisième en fibre de verre tissée.

Nous avons élaboré un multicouche, ou nous avons renforcé la résine avec les trois couches précédentes (fibre de verre sous forme de mat 100, fibre de verre mat 600 et fibre de verre tissée).

Pour étudier l'influence de la charge, nous avons choisit une charge qui est la poudre de cuivre, nous avons chargé les matériaux composites à des taux de 5%, 10% et 15%.

Nous avons analysé 15 échantillons, nous les avons caractérisé en essai de traction flexion et dureté, essais de calcination, de densité et de résilience. Nous avons soumis nos

## Introduction générale

---

différents échantillons à des observations au microscope optique et microscope électronique à balayage.

Dans notre étude on s'est intéressé à deux aspects:

- 1) l'influence du renfort sur le comportement mécanique du matériau composite, en comparant l'effet de la nature de la couche.
- 2) L'influence de la charge de cuivre sur le comportement mécanique du matériau composite, pour un même renfort ; on étudie l'effet de la variation du taux de charge (cuivre).

Pour mener à bien cette étude, nous avons départagé notre travail en quatre chapitres :

- Le premier chapitre est « *Généralités sur les matériaux* » comporte des définitions sur les matériaux composites leurs importance en industrie, notamment en industrie naval.
- Le deuxième chapitre intitulé « *Comportement mécanique des matériaux composite* » porte sur certaines notions de théorique du comportement mécanique des matériaux composites, lois de comportement en traction et flexion...
- Les techniques et procédures expérimentales utilisées pour la caractérisation de nos échantillon est détaillé dans le chapitre trois qui est « *Techniques expérimentales* ».
- le dernier chapitre est « *Résultats et discussions* », ou nous exposons nos résultats et constatations.
- Une conclusion générale est tirée dans le but d'accentuer nos résultats et nous terminons notre travail par des perspectives, dans lesquelles on citera les techniques de caractérisation qu'on n'a pas pu réalisées par manque de temps ou de disponibilité de la technique.

# *Chapitre I*

*Généralités 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 : [1]**

Les matériaux composites, appelés souvent composites, sont des matériaux solides et multiphasiques. Ils sont une combinaison de matériaux de composition ou de formes différentes et sont constitués d'au moins deux matériaux immiscibles aux caractéristiques complémentaires. La zone de contact entre chacun des matériaux constitue l'interface, dont la qualité est très influente sur les caractéristiques mécaniques et physiques du composite.

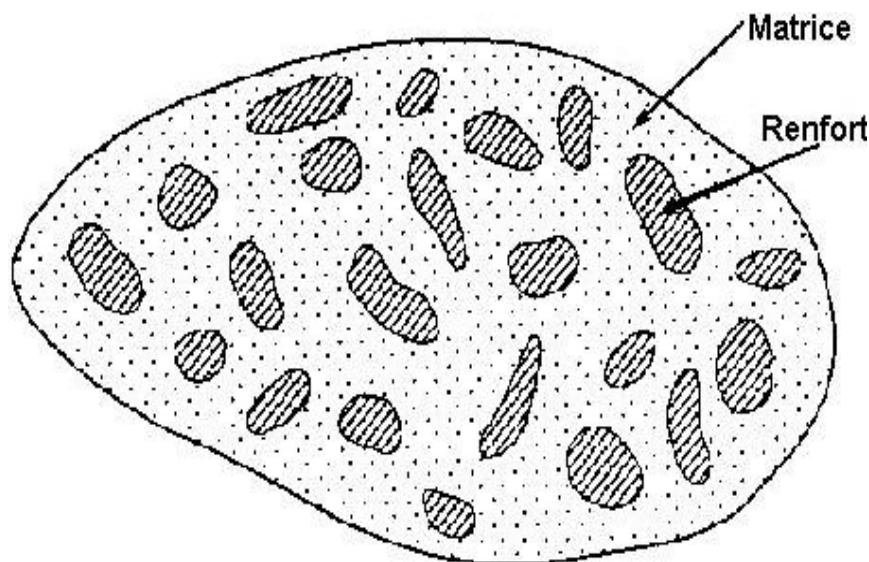


Figure I.1: Schéma illustratif d'un matériau composite.

**I.2. Intérêt des matériaux composites : [2]**

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

- l'allègement des structures,
- La bonne tenue en fatigue,
- La 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.

### **I.3. Différents types de matériaux composites : [2]**

On distingue deux types de composites: les composites de grandes diffusions et les composites hautes performances.

#### **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 déduit des hautes valeurs ajoutées. Les renforts sont plutôt des fibres longues. Le taux de renfort est supérieur à 50%.

Ces composites sont élaborés par les procédures suivantes :

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

### **I.4. Classification des matériaux composites : [3]**

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

#### **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 leur tour 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 : [1]**

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).

#### **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.

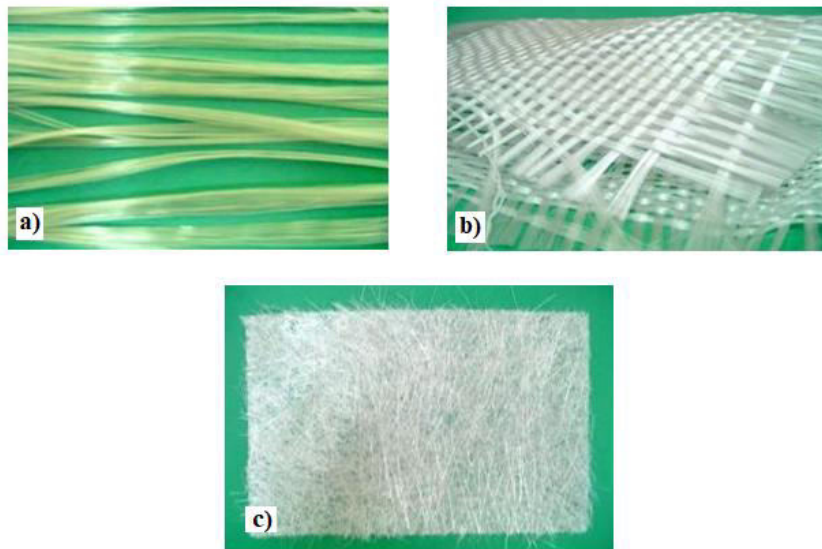
Les renforts fibres se présentent sous diverses formes commerciales.

➤ 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.

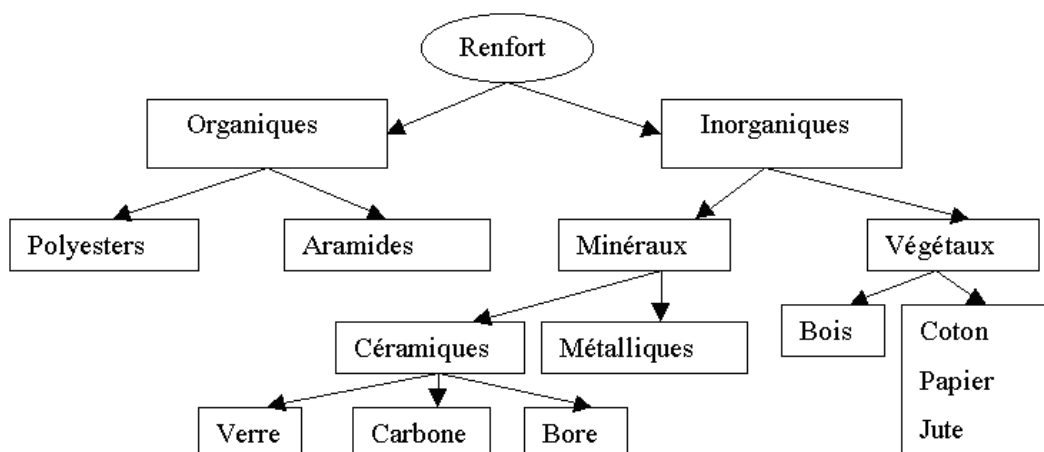


**Figure I.2: les différentes formes des renforts fibres de verre**

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

### I.5.1.2. Différentes natures de renfort:[1]

Les renforts peuvent être de natures différentes, comme illustré sur la figure (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 supérieures 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 haute résistance mécanique pour la réalisation des pièces structurales.

Les fibres de verre **E** sont les plus utilisées, le tableau suivant représente quelque composition de verre E, D et R :

**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	

**I.5.1.2.1 Avantages et Inconvénients :** on donne certaines caractéristiques des fibres de verre que nous résumons dans le tableau 2

**Tableau I.2 : avantages et inconvénient de la fibre du verre E, D et R**

avantages	inconvénients
-bon rapport de performance mécanique/prix - bonne résistance spécifique (rapport résistance à la traction/densité.) -bonne adhérence avec toutes les résines (existence d'ensimage) -incombustibilité ; -dilatation et conductivité thermiques faibles	- faible module (fragile par rapport à l'aramide et Carbone). - Vieillessement au contact de l'eau (problème pour les navires)

- **Les fibres de carbone**

Les fibres de carbone sont élaborées à partir d'un polymère de base appelé précurseurs, se présentant lui-même sous forme de fibres orientées et réticulées. Le plus utilisé de ces précurseurs est le Poly Acrylonitrile (PAN).

Les fibres de carbone possèdent de très bonnes caractéristiques mécaniques d'autant plus que leur masse volumique est faible (généralement inférieure à 2000Kg/m<sup>3</sup>). En outre, il faut noter que les fibres de carbones ont une excellente tenue en température en atmosphère non oxydante.

Il est important de noter que les fibres de carbone sont sensibles à l'oxygène dès 400°C (pour des applications en atmosphère oxydante, dans le domaine spatiale, ces matériaux sont revêtus d'une couche protectrice anti-oxydante). les fibres de carbone présentent une mauvaise résistance aux chocs. Le prix de ces fibres est relativement élevé, d'ailleurs, elles sont réservées principalement pour les utilisées dans des applications structurales.

Afin d'améliorer la liaison fibre/résine, les fibres de carbone sont soumis à un traitement de surfaces. Ce dernier est suivi par un procédé d'ensimage textilo-plastique qui facilite l'accrochage de la matrice.

- **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 calibrable et plus difficilement manipulables.

## **I.5.2. Les charges et les additifs : [4]**

### **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.

### **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.

#### **I.5.3.1 : Les différents types de matrices : [5]**

##### **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 ponté (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.

**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 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 carbones : 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 par fois envisager d'utiliser des matrices dont l'inertie chimique est meilleur à plus haute température, certains métaux et alliages

métalliques peuvent répondre à cette exigence, on a donc recours à des matrices métalliques dans certains 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 4 nous résumons l'essentiel de ces matrices

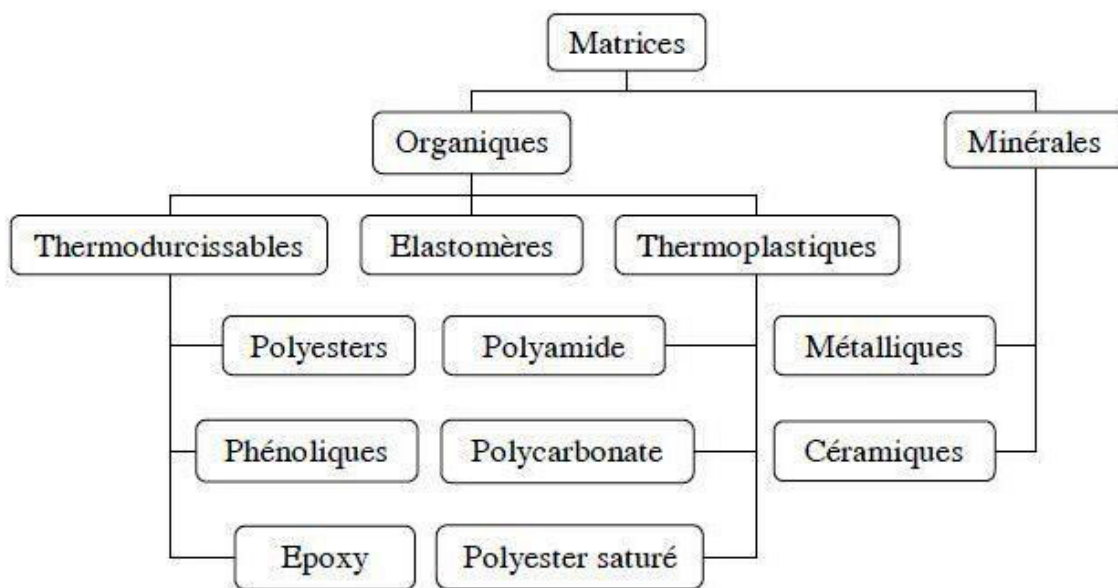


Figure I.4 : Différentes familles de matrice

#### I.6. LA MISE EN OEUVRE DES MATERIAUX 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
- Moulage par projection simultanée
- Injection thermodurcissable BMC
- Compression thermodurcissable SMC
- Enroulement filamentaire (ou bobinage)

### I.6.1. Moulage au contact : [6]

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.

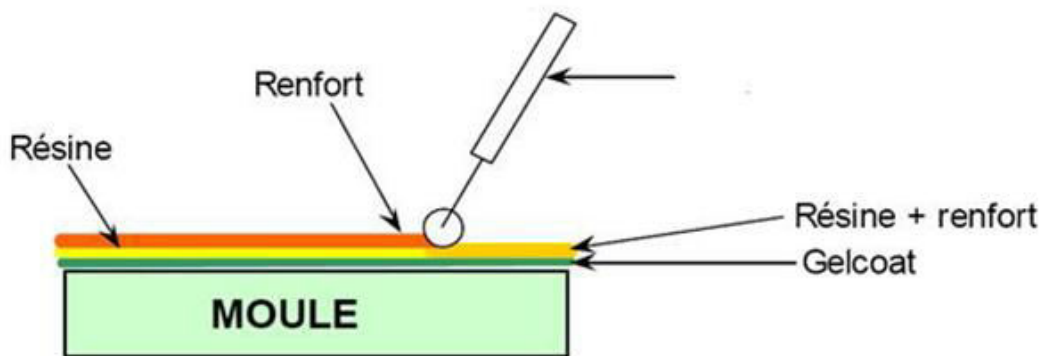


Figure I.5: Procédé de moulage par contact

### I.6.2. Moulage par projection simultanée : [6]

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.

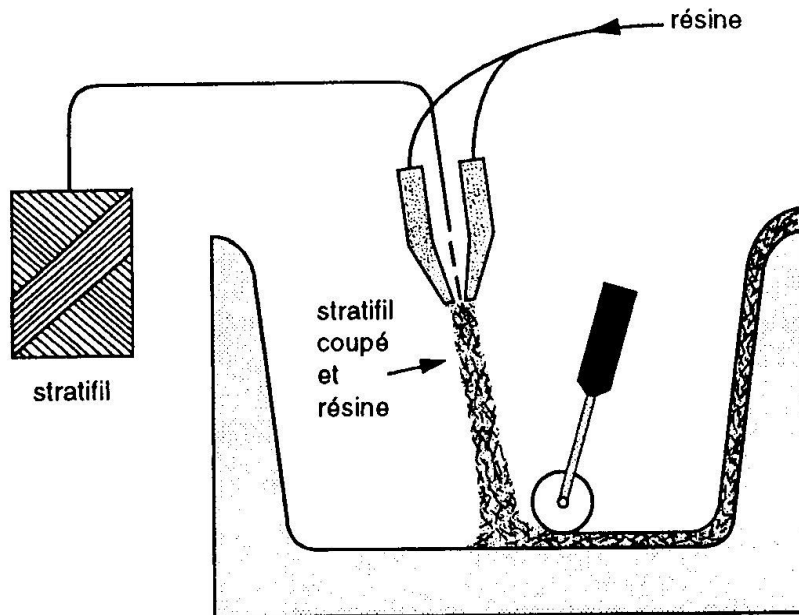


Figure I.6 : Moulage par projection simultanée

### I.6.3. Injection thermodurcissable BMC: (Bulk Molding Compound). [7]

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

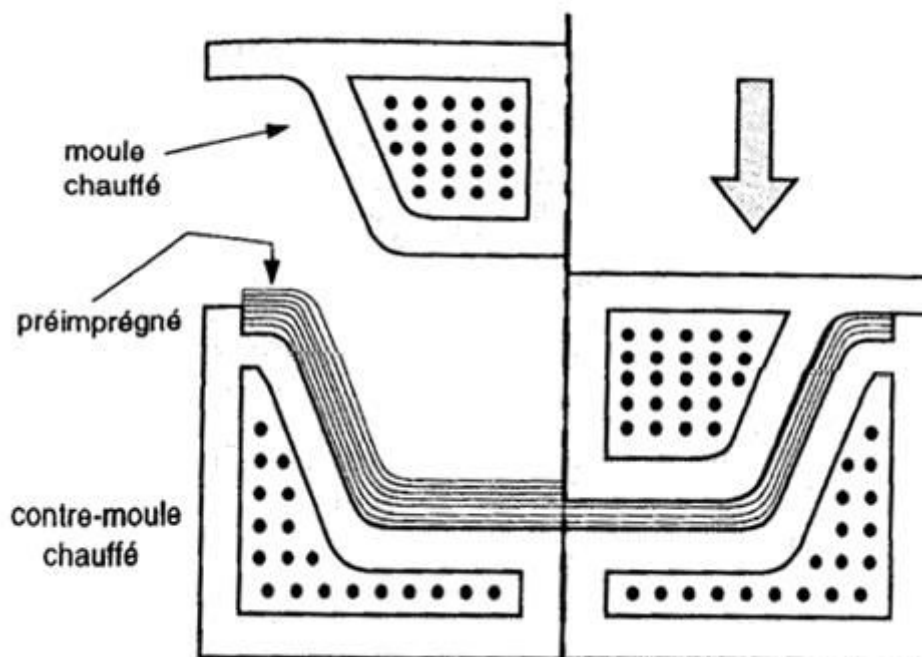


Figure I.7: Injection thermodurcissable BMC

**I.6.4. Compression thermodurcissable SMC: (Sheet Molding Compound) [7]**

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.

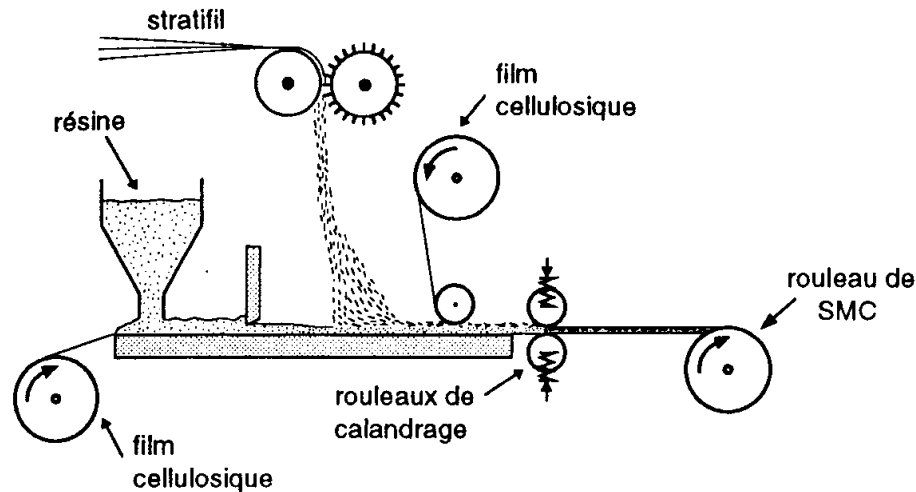


Figure I.8 : Compression thermodurcissable SMC

**I.6.5. Enroulement filamentaire (ou bobinage): [7]**

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.

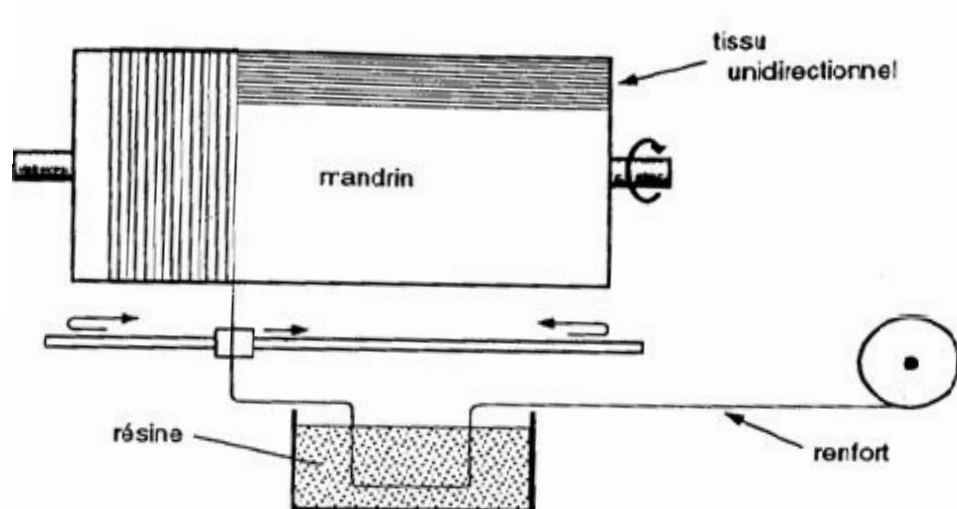


Figure I.9: Enroulement filamentaire (ou bobinage)

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

### I.7 Architecture du composite [8]

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

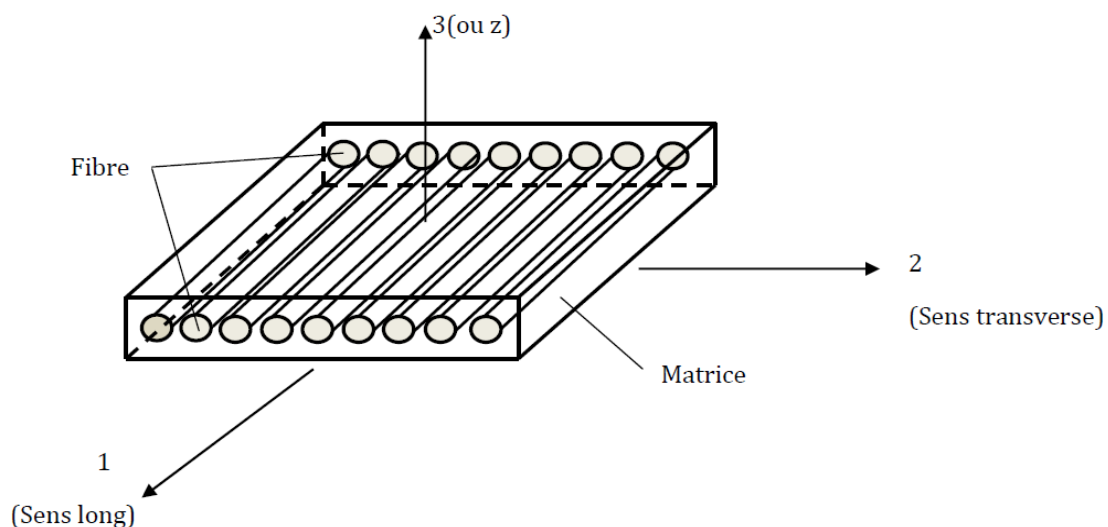
Les monocouches ;

Les stratifiées ;

Les sandwiches.

#### 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.)



**Figure I.10 : Pli à renforcement unidirectionnel.**

#### I.7.2. les Sandwichs :

Les matériaux sandwich 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. (Voir figure)

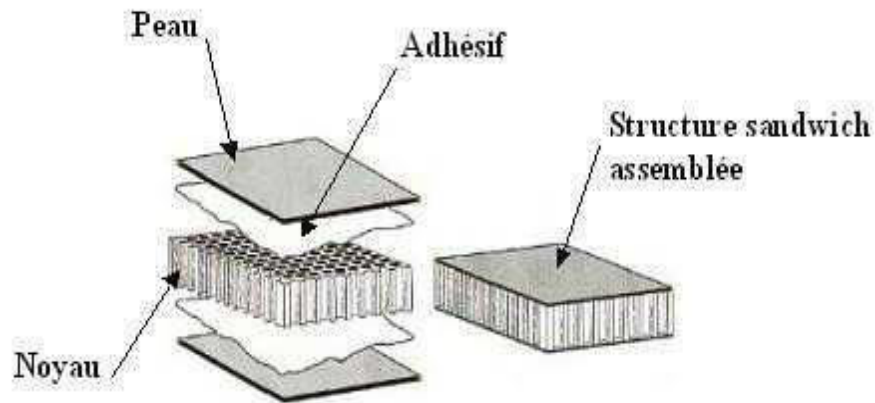


Figure I.11 : Constitution d'un sandwich.

### 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.

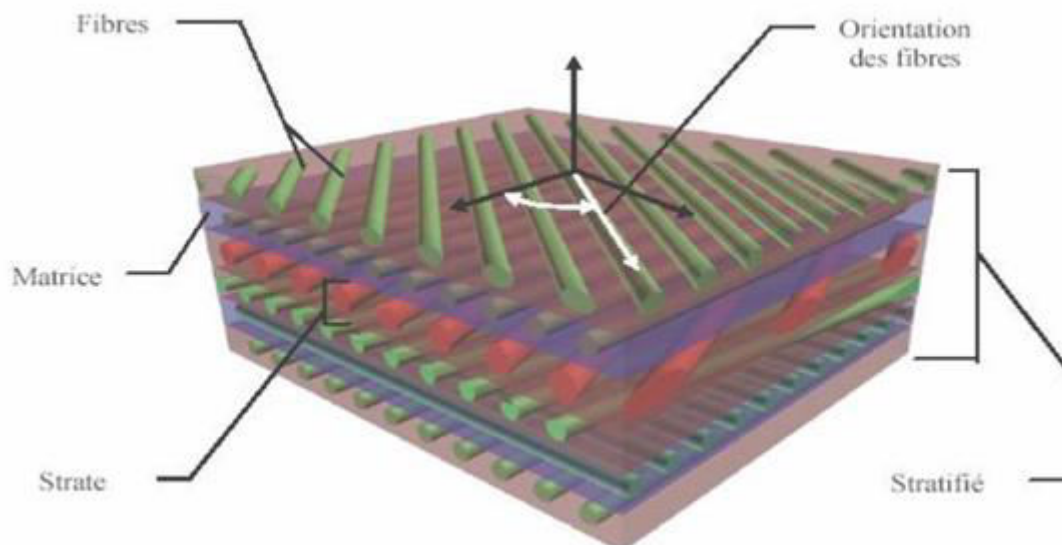


Figure I.12 : composite stratifié

Les stratifiés peuvent être de trois types :

- 1) Equilibrés : le stratifié contient autant de couches orientées suivant la direction + 45 que de couches suivant la direction - 45,
- 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° que de couches à 90°.

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 : [1]**

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.

### **I.9 Domaines d'application : [5]**

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, club de golf,...)
- 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.

## **I.10. Les matériaux composites dans la construction navale :**

### **I.10.1.Introduction : Généralités sur la construction navale [9]**

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.

### **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.

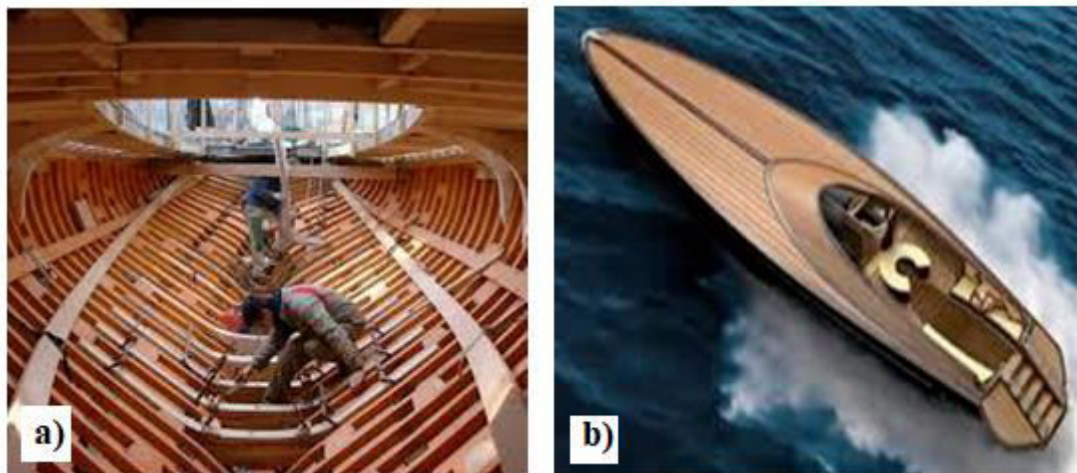
#### **a) la construction des navires en bois :**

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 contreplaqué a, grâce à l'époxy (100% étanche), retrouvé un réel intérêt dans la construction de bateaux moderne. 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.



**Figure I.14 : Construction des navires en acier :**  
a) Charpente en acier, b) Navire 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.

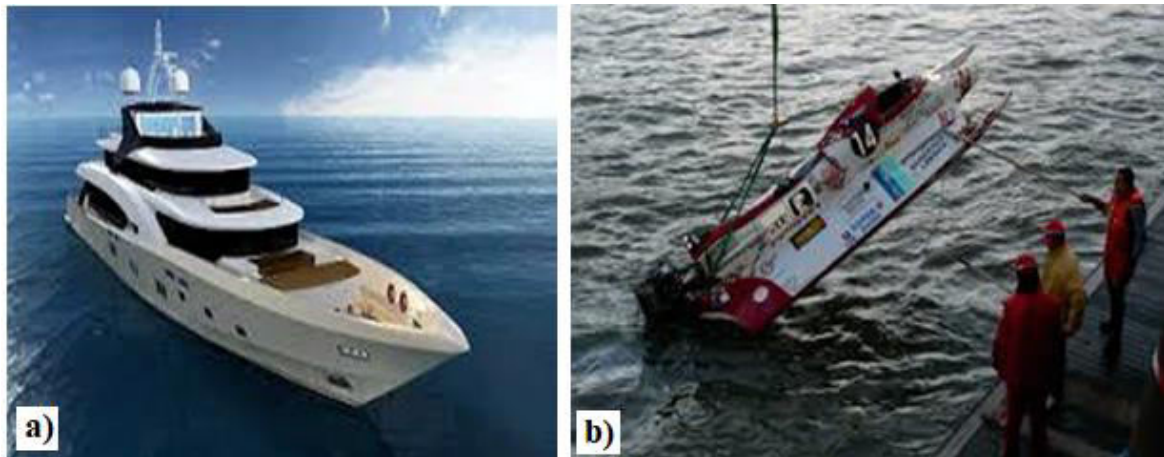


**Figure I.15 Construction des navires en aluminium:**  
a) Charpente en aluminium, b) Navire en aluminium.

### 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.



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

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

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 donnons 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 III

*Comportement mécanique des matériaux composites*

## Introduction

Le facteur déterminant dans le choix des matériaux est la connaissance de leur comportement mécanique.

Les moyens qui permettent d'étudier le comportement mécanique et d'évaluer numériquement les propriétés des matériaux sont les essais mécaniques, dans ce chapitre on va aborder quelques essais qu'on a pu réaliser.

### II.1 Propriétés physique et mécaniques des composites : [10]

Les propriétés physiques et mécaniques des composites sont complexes car directement liées au comportement d'un mélange fortement anisotrope.

#### a) loi des mélanges :

La loi des mélanges permet sous certaines conditions de déterminer certaines caractéristiques du composite en fonction de la fraction volumique du renfort. Par exemple si on prend :

- $P_M$  Propriétés de la matrice
- $P_R$  Propriétés du renfort
- $P_C$  Propriétés du composite
- $V_C$  Fraction volumique(%) du renfort

La propriété du composite est :

$$P_C = V_R P_R + (1 - V_R) P_M \quad (\text{II.1})$$

#### b) - la densité du composite :

À partir de la loi énoncée ci-dessus on peut calculer la densité moyenne du composite.

Si :  $\rho_M$  densité de la matrice et  $\rho_R$  densité du renfort, alors la densité du composite  $\rho_C$  est :

$$\rho_C = V_R \rho_R + (1 - V_R) \rho_M \quad (\text{II.2})$$

#### c) Le module de Young du composite $E_c$ , $R_{e_c}$ et $R_{m_c}$ :

Lorsqu'on mélange deux matériaux au comportement élastique linéaire et de module de Young différent, le produit est encore élastique et linéaire.

Le calcul de module de Young est possible à partir de la loi des mélanges si la force est parallèle aux fibres. Dans ce cas sous l'effet d'une force  $F$ , la matrice, les fibres et le composite subissent une déformation unitaire identique, ce qui se traduit par :

## Chapitre II Comportement mécanique des matériaux composite

$$\varepsilon_C = \varepsilon_M = \varepsilon_R \quad (\text{II.3})$$

Par application de la loi des mélanges on obtient :

➤ Pour le module de Young :

$$E_C = V_R E_R + (1 - V_R) E_M \quad (\text{II.4})$$

De la même manière on peut déterminer :

-La limite d'élasticité du composite

$$R_{e_C} = V_R R_{e_R} + (1 - V_R) R_{e_M} \quad (\text{II.5})$$

-La résistance maximale à la traction du composite :

$$R_{m_C} = V_R R_{m_R} + (1 - V_R) R_{m_M}$$

Pour une force perpendiculaire au sens des fibres, les contraintes dans la matrice, dans les renforts et dans le composite sont identiques. Cela se traduit par :

$$\sigma_R = \sigma_M \quad (\text{II.6})$$

### II.2 Mode d'essais mécaniques :

#### II.2.1 Essai de traction : [3]

L'essai de traction est le plus fondamentale parmi tous les essais mécaniques. Il sert à déterminer les principales caractéristiques mécaniques telles que le module d'élasticité, le coefficient de Poisson, la limite d'élasticité, la résistance à la rupture, l'allongement après rupture et le coefficient de striction.

Son exécution est facile et les résultats obtenus servent à dimensionner toutes sortes des pièces allant d'un pignon microscopique jusqu'à la structure métallique d'un grand hall. Dans la recherche on l'applique pour la caractérisation de nouveaux matériaux et dans industrie pour les contrôles périodiques servant à surveiller la qualité des alliages, des polymères et des céramiques.

Le principe de cet essai est de soumettre une éprouvette normalisées à une extension progressive dans le sens de la longueur jusqu'à obtention de la rupture.

L'essai de traction permet de d'établir la contrainte maximale de traction définit par la formule suivante :

$$\sigma = F/b.h \quad (\text{II.7})$$

Avec : F : force maximale

b et h: longueur et épaisseur de l'éprouvette

La direction d'application de la l'effort permet d'avoir différent cas de traction :

### II.2.1.1 : Traction longitudinale [8]

L'effort  $F$  est appliqué dans la direction des fibres (composite unidirectionnel), comme le montre la figure (II.1)

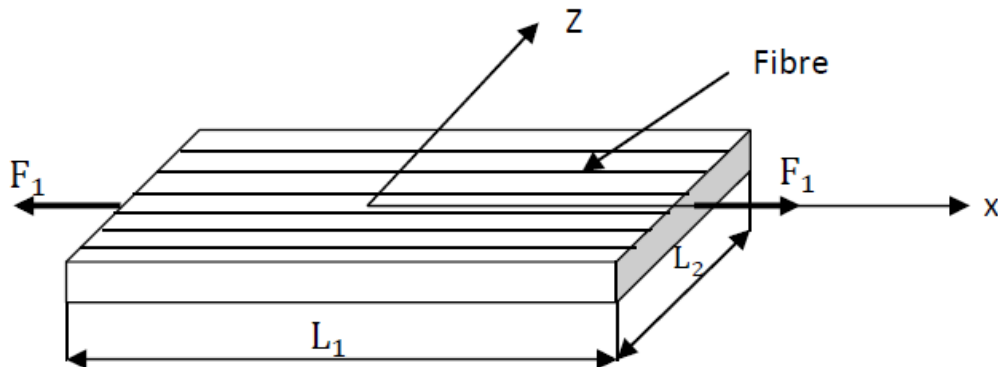


Figure II.1 : traction longitudinale

Les caractéristiques tirées sont :

La contrainte normale :

$$\sigma_{xx} = \frac{F_1}{S_1} \quad (\text{II8})$$

Avec  $S_1$  : section droite du matériau

Les déformations longitudinales et transversales :

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\Delta L_1}{L_1}$$

$$\varepsilon_{zz} = \frac{\Delta L_2}{L_2}$$

Le module de Yong  $E$  :

$$E = \frac{\sigma_{xx}}{\varepsilon_{xx}}$$

### II.2.1.2: Traction transversale :

L'effort  $F$  est appliqué suivant le sens de trame (direction transverse aux fibres)

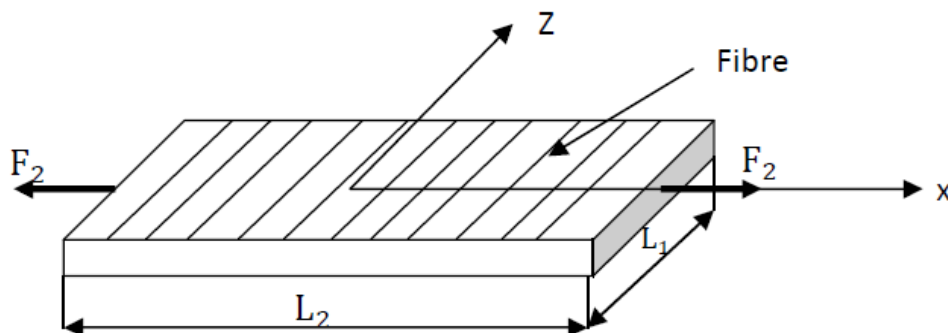


Figure II.2 : traction transversale

## Chapitre II Comportement mécanique des matériaux composite

La contrainte normale est :

$$\sigma_{xx} = \frac{f_2}{S_2}$$

Avec  $S_2$  : section droite du matériau sur laquelle s'exerce la charge

Le module de Yong :

$$E = \frac{\sigma_{zz}}{\varepsilon_{zz}}$$

### II.2.1.3 : Traction hors axe :

L'effort  $F$  est appliqué à un angle de  $45^\circ$  par rapport aux fibres (les fibres sont inclinées de

$45^\circ$ ), cet essai est utilisé pour mesurer le module de cisaillement  $G$

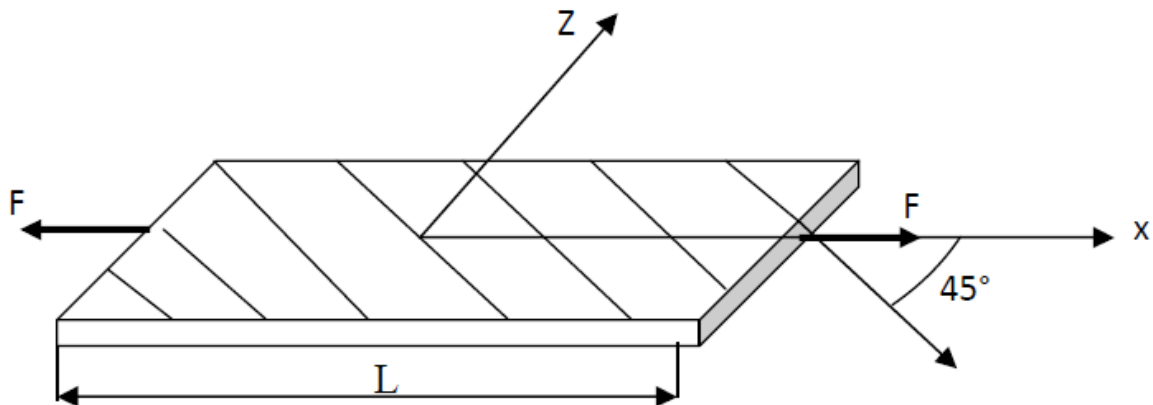


Figure II.3 : Traction hors axes

La contrainte normale est :

$$\sigma_{xx} = \frac{F}{S}$$

Le module de Yong est :

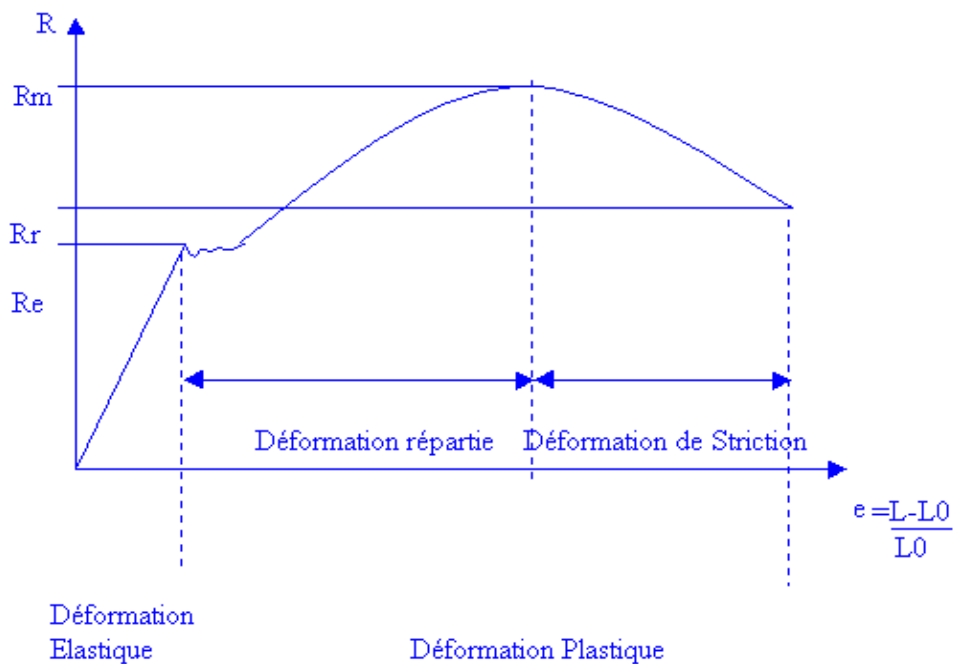
$$E_{45} = E_{xx} = \frac{\sigma_{xx}}{\varepsilon_{xx}}$$

L'essai de traction ne permet pas toujours d'avoir les caractéristiques exactes à cause de la présence des contraintes de contact qui sont dû à la fixation de l'éprouvette.

Lors de l'essai de traction, il faut y'avoir un désalignement entre la direction d'application de la charge et celle des fibres, sinon les valeurs mesurées seront nettement plus faibles que les valeurs réelles du module d'Yong (cas d'un composites unidirectionnel)

Un problème qui n'est pas aussi critique dans le cas d'un essai de traction transversale

- **Courbe conventionnelle :**



L'essai de traction donne plusieurs valeurs importantes :

Le module de Young  $E$  ou module d'élasticité longitudinale ;

La limite élastique  $R_e$  ou  $\sigma_e$  qui sert à caractériser un domaine conventionnel de réversibilité ;

La limite à la rupture  $R_m$  ou  $\sigma_m$  ;

L'allongement à la rupture  $A$ , qui mesure la capacité d'un matériau à s'allonger sous charge avant sa rupture, propriété intéressante dans certaines applications ;

Le coefficient de Poisson, qui chiffre la variation de volume induite par la déformation des matériaux dans le domaine élastique.

### II.2.2 Essai de flexion : [8]

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, et, le module de Young. Pour cet essai deux configurations qui peuvent être retenues : essai de flexion trois points et essai de flexion quatre points.

#### II.2.2.1. Essai de flexion trois points :

Cet essai consiste à imposer une déformation (ou *flèche*) à une éprouvette normalisée (barreau rectangulaire) placé sur deux appuis, à l'aide d'un poinçon se déplaçant à vitesse constante à mi-distance des deux appuis, puis on mesure la force qu'oppose l'éprouvette à cette déformation.

### II.2.2.2 : Principe de l'essai :

Le principe de cet essai est simple car il consiste à déformer à une vitesse constante de 2 mm/mn un barreau (éprouvette) rectangulaire met entre deux appuis et d'une panne située à égale distance des appuis (pour notre cas).

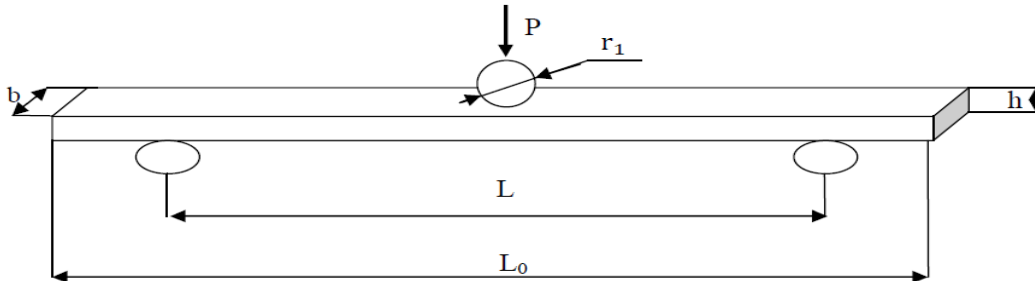


Figure II.4 : essai de flexion trois points

Avec :

$P$  : charge appliquée,  $L$  longueur entre appuis ;  $L_0$  : longueur de l'éprouvette ;  $h$  : hauteur de l'éprouvette.

$b$  : largeur de l'éprouvette.

$r$  : rayon de la panne centrale

La contrainte normale est nulle le long de l'axe neutre de l'éprouvette, alors elle va croissante en traction d'un côté de cette axe et croissante en compression de l'autre côté.

En d'autre terme les éléments de volume de l'éprouvette ne sont pas soumis à la même sollicitation mécanique contrairement à l'essai de traction et de compression

Il y a aussi une autre contrainte qui atteint le maximum au niveau de la fibre neutre dite contrainte de cisaillement.

On enregistre la courbe contrainte déformation :

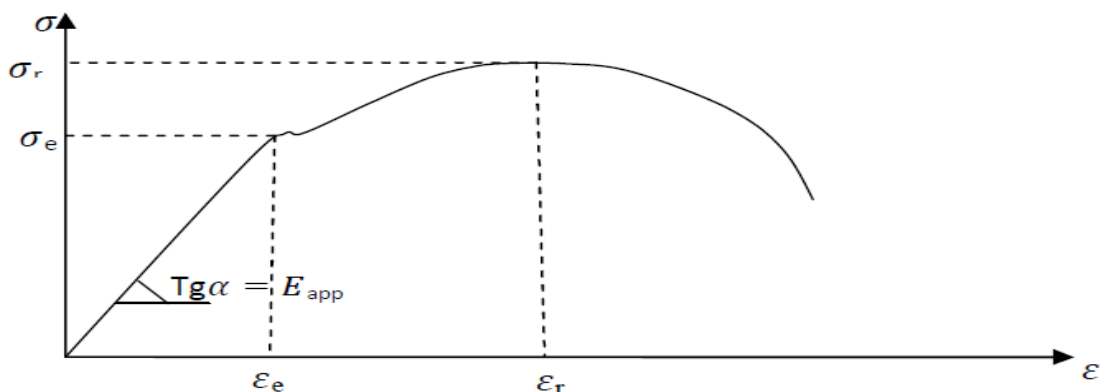


Figure II.5 : courbe de contrainte déformation pour un matériau ductile

L'analyse de cette courbe permet l'évaluation des caractéristiques principales du matériau:

Module apparent :

## Chapitre II Comportement mécanique des matériaux composite

---

$$E_{\text{App}} = \frac{L^3}{4bh^3} \frac{\Delta P}{\Delta y}$$

Contrainte à rupture :

$$\sigma_r = \frac{3P_{\text{max}} L}{2bh^2}$$

Déformation à rupture :

$$\varepsilon_r = \frac{6hf}{l^2}$$

Contrainte de cisaillement :

$$\tau = \frac{3P}{4bh}$$

# *Chapitre III*

*Techniques expérimentales*

### III. Introduction :

Dans cette partie, nous présentons les constituants choisis pour l'élaboration du matériau composite, le mode d'élaboration adopté et les techniques expérimentales utilisées pour la caractérisation physique, chimique et mécanique de notre matériau composite.

### III.1. Matériaux et Matériels Utilisés :

#### III.1.1 Résine :

La résine utilisée est une résine polyester ortho phtalique de stratification de couleur bleu opaque, moyenne réactivité, nommée LORNESTER H511 TA, dont la fiche technique est donnée dans le tableau III.1.



Figure III.1 : résine à l'état liquide

Tableau III.1: Fiche technique de la résine :

<b>Propriétés mécaniques de la résine :</b>	
-Résistance en traction	40-60 MPa
-Dureté Barcol	40-45
-Résistance en flexion	80-100 MPa
-Méthode d'application	Application manuelle
-Densité	1,09-1,11kg/dm <sup>3</sup>
-Temps de durcissement	45-60mins

### III.1.2 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 1,5-2% en masse.



**Figure III.2 : flacon contenant le durcisseur**

### III.1.3 La Balance

Pour nos mélanges, nous avons utilisé une balance avec une précision de  $10^{-2}$



**Figure III.3 : Balance**

### III.1.4 Mélangeur

Pour bien répartir la quantité du durcisseur dans la résine et permettre une bonne distribution de ce dernier, nous avons utilisé un mélangeur électrique, représenté sur la figure III.4



Figure III.4 : mélangeur électrique

### III.1.5 Les renforts

Dans cette étude on a utilisé différentes formes de fibre de verre comme nous montre la figure III.5 ci dessous :

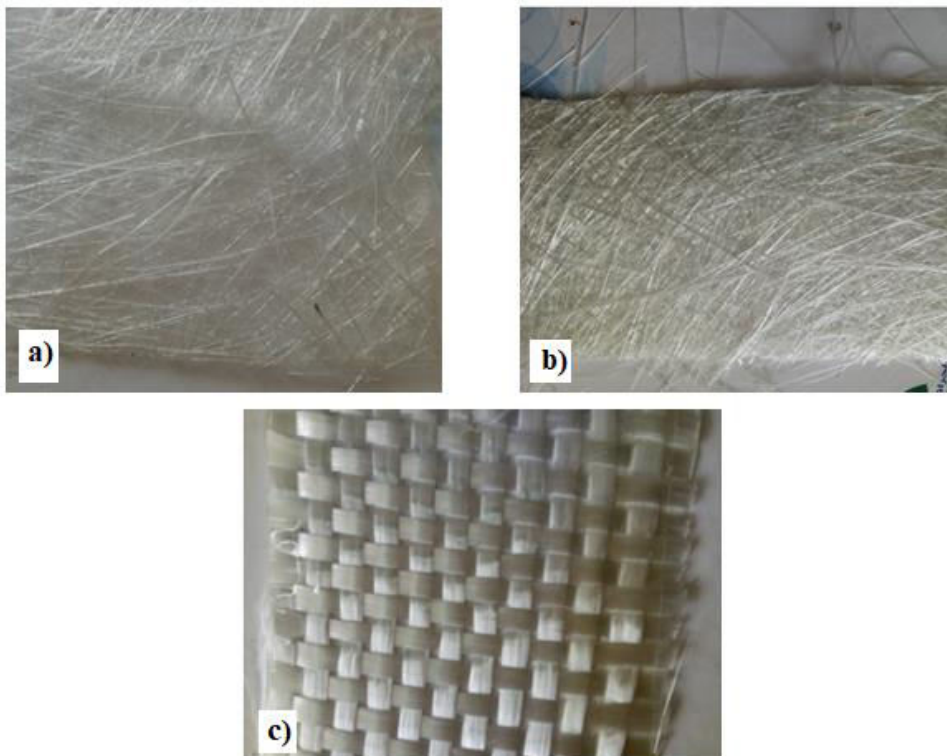


Figure III.5 Différentes forme de fibres de verre utilisées :

a) Fibre de 100, b) fibre de 600, c) fibre tissu

Fibre de 100 :  $100\text{g/m}^2$

Fibre de 600 :  $600\text{g/m}^2$

### III.1.6 Les Charges

Nous avons utilisé de la poudre de cuivre sous forme de particules sphériques, comme indiqué sur la figure III. 6.



**Figure III.6 la poudre de cuivre utilisé comme charge**

### III.1.7 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.7 La cire utilisée lors du moulage**

### III.1.8 Le moule

Le moule a été fabriqué 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 bois qui délimite latéralement le moule. La figure III.8 représente certaines étapes d'élaboration et d'utilisation du moule.



Figure III.8 étapes d'élaboration et d'utilisation du moule

### III.1.9 Le rouleau

Utilisé pour bien étaler la résine pendant le moulage comme illustré sur cette figure :



Figure III.9 le rouleau utilisé pour étaler la résine

### III.1.10 : Etapes suivies pour l'élaboration du matériau à étudier :

Pour la préparation du stratifié, nous avons suivi 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.

- Versement d'une quantité de résine avec durcisseur pour le matériau composite chargé de poudre de cuivre à différents pourcentage de cuivre pour le matériau composite avec particules de cuivre
- 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.

## III.2. Caractérisation du matériau composite

### III.2.1 Caractérisation physique

#### III.2.1.1 Densité

Pour déterminer la densité du matériau composite élaboré on a utilisé le densimètre (Figure III.10) du laboratoire de l'usine *SISCOPLAST*.

##### *Éléments constituant le densimètre*

Les éléments essentiels constituant ce densimètre sont :

- une balance analytique d'une précision de 0,1 mg appropriée pour peser un échantillon suspendu ;
- un bain liquide;
- un liquide d'immersion: de l'eau déionisée (ou distillée) ou de l'alcool éthylique (96 %).
- Dans notre cas, on a utilisé l'éthanol comme liquide.

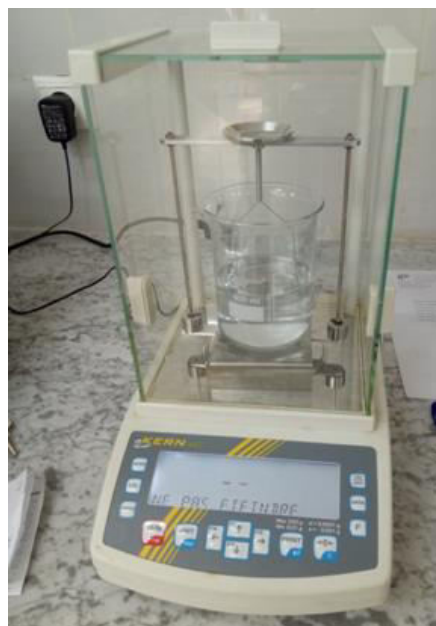


Figure III.10: Densimètre

**Mode opératoire du densimètre :**

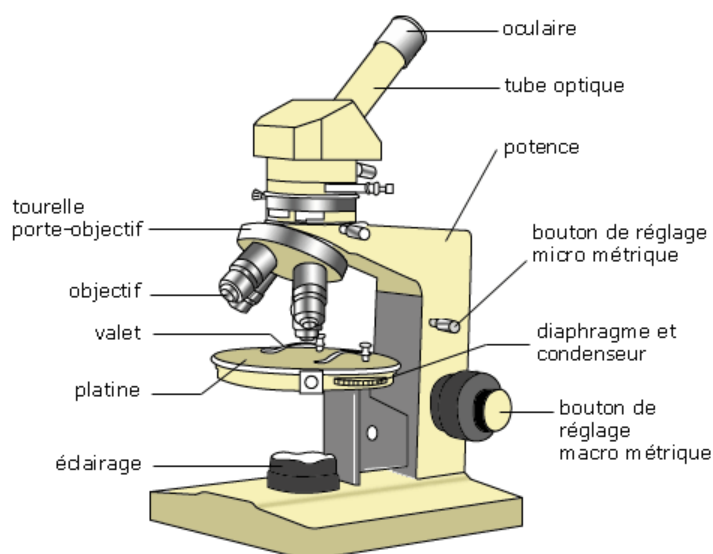
L'éprouvette doit d'abord être pesée dans l'air. Elle doit ensuite être fixée à un crochet approprié et le crochet avec l'éprouvette, doivent être suspendus dans la balance. Puis l'éprouvette doit être immergée dans de l'éthanol. On doit faire attention à ce que l'éprouvette soit totalement recouverte par le liquide.

La masse de l'éprouvette ne doit pas être inférieure à 1 g ni supérieure à 5 g.

**III.2.1.2 Observation au microscopique optique [12]**

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. (Voir figure III.11)

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.11: Schéma d'un microscope optique monoculaire**

**III.2.1.3 Observation au microscopique électronique à balayage [13]**

Dans l'analyse au microscope électronique à balayage l'image n'est pas formée par une lentille objective mais plutôt de manière séquentielle en balayant la surface de l'échantillon par un faisceau d'électrons. Le Microscope Electronique à Balayage (MEB) fournit des images de la surface en relation avec le mode de diffusion des électrons par l'échantillon.

Le principe de balayage consiste à parcourir la surface de l'échantillon par des lignes successives et à transmettre le signal du détecteur à un écran cathodique dont le balayage est synchronisé avec celui du faisceau incident.

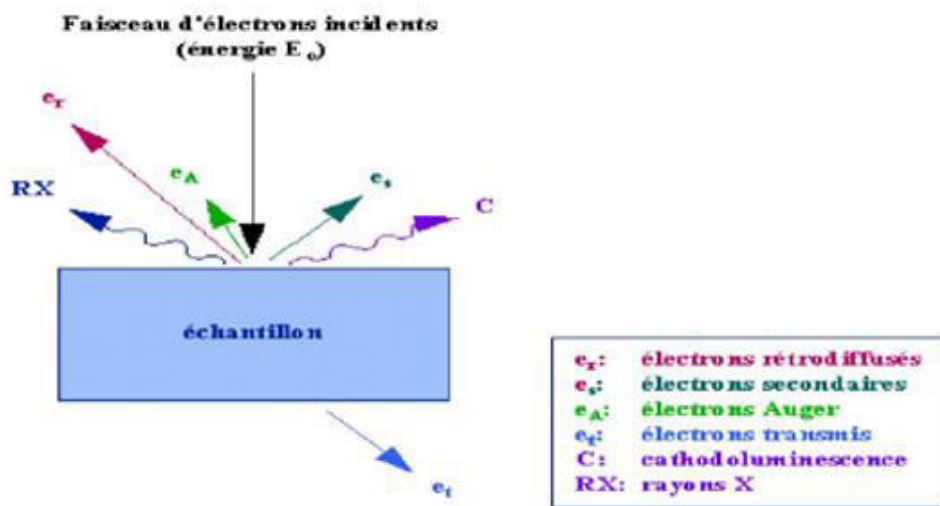


**Figure III.12 : Microscope Electronique à Balayage(MEB)**

Lors de l'interaction du faisceau d'électron avec l'échantillon, il a des différentes émissions de particules qui sont analysées à l'aide de détecteurs appropriés telle que : électrons secondaires, émission de rayons X, électrons rétro diffusés... etc.

Le nombre d'électrons secondaires et rétrodiffusés émis varie en fonction du point d'impact du faisceau d'électrons sur la surface. Ces électrons sont détectés dans des détecteurs.

Une image est obtenue en relation avec l'intensité du courant électrique produit en chaque point de la surface. La topographie de l'échantillon est ainsi obtenue.



**Figure III. 13 : Les différentes émissions produites lors de l'interaction du faisceau d'électron avec la surface de l'échantillon.**

Les observations sont faites par un détecteur des électrons qui sont de deux types:

➤ **Electrons secondaires :**

La détection de ces électrons fournit des informations sur la topographie de l'échantillon sur une profondeur de 10 nm. L'analyse de ces électrons permet d'obtenir une image caractéristique de la surface. Ces électrons représentent un bon outil pour l'observation des contours, de la morphologie de l'échantillon.

➤ **Electrons rétrodiffusés :**

La détection de ces électrons se fait par contrastes chimiques en fonction du numéro atomique des éléments constituant l'échantillon. Plus le numéro atomique de l'atome est élevé, plus le signal est intense et plus la zone de l'image est claire. C'est le contraste de phase. L'image obtenue est donc fonction de la composition chimique de l'échantillon.

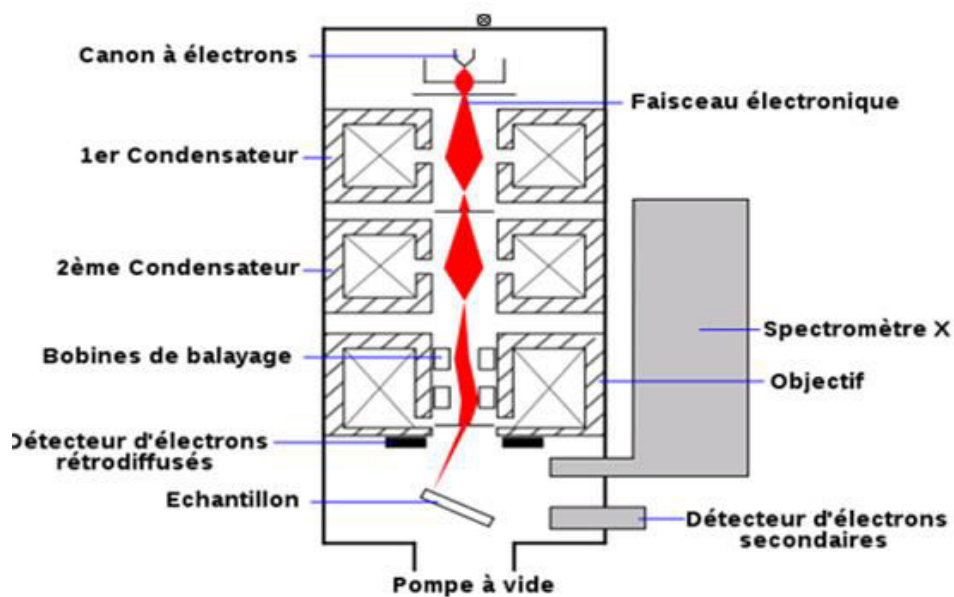


Figure III. 14 : Schéma illustrant le principe de fonctionnement du MEB

**III.2.1.4 Comparaison entre microscopes optiques et électroniques :**

Dans le tableau suivant nous représentons quelques différences entre les microscopes utilisés :

**Tableau7 : différence entre MO et MEB**

<b>Microscope optique</b>	<b>Microscope électronique</b>
Technique simple	Technique complexe
Moins lourd	Sophistiqué
Plus répandu	Rare
Faisceaux lumineux	Faisceau d'électrons
Lentilles en verre	Lentilles électrostatiques, magnétiques
Grossissements 2000 fois	Grossissements 2 000 000 fois
Résolution limitée	Résolution illimité

### III.2.2 Caractérisation chimique : la calcination [14]

Pour détermination du taux de renfort dans le matériau composite, on utilise la calcination

#### III.2.2.1 Définition de la calcination :

Pour déterminer les teneurs massiques des constituants (renfort, résines, charges,.....) nous avons utilisés l'essai de calcination (perte à feu).

Les moyens mis en disposition sont :

- Un four spécifique où la température peut atteindre 1100°C, équipé d'un thermostat et d'une fente permettant l'évacuation des gaz de combustion tout en empêchant l'entrée de l'air
- Une balance de précision de  $10^{-4}$
- Des creusets en céramique.

L'opération consiste à peser des échantillons à sec et les placer dans des creusets préalablement pesés. Le tout est placé dans un four à la température de **800°C**, pour laquelle la résine est entièrement calcinée, pendant 30 mn. A la fin de cette opération les creusets et les fibres sont repesés à la température ambiante. Sur la figure III.10 on représente les creusets avec le reste de la calcination (les fibres de verres et la charge Cu) ainsi que le four utilisé pour la calcination.

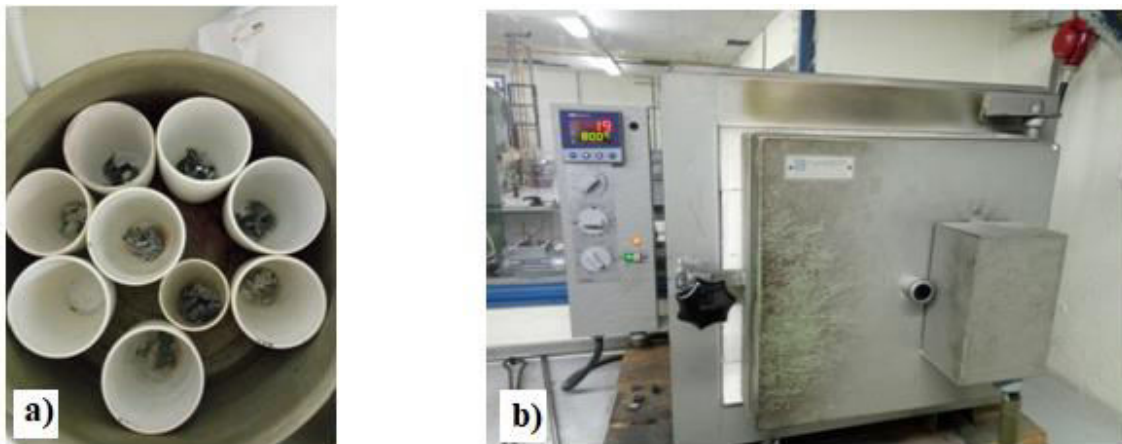


Figure III 14 :a) les creusets en céramiques, b) four spécifique pour la calcination

#### III.2.2.2 Calcul du taux de renfort dans le matériau composite

Pour calculer la quantité de charge et de renfort existant dans le matériau composite, nous avons utilisé la formule suivante :

$$T(\%) = \frac{C - B}{A} \quad (III. 1)$$

Où :

$A$  : masse de l'échantillon;

$B$  : masse de creusé vide ;

$C$  : masse de creusé avec échantillon après calcination.

### III.2.3 Caractérisation mécanique

Pour connaître le comportement mécanique du matériau, on lui fait subir plusieurs tests : *l'essai de traction* pour déterminer son module d'élasticité, sa résistance à la traction sa déformation en fonction de la contrainte de traction appliquée et sa résistance maximale lors d'un chargement en traction. *L'essai de flexion* nous permet de déterminer le module élastique en flexion et la flèche ; *l'essai de dureté* pour connaître la dureté générale du matériau composite et *l'essai de micro dureté* pour cibler la dureté de chaque constituant de notre matériau composite. *L'essai de résilience* nous informe sur la capacité de résistance de notre matériaux lorsqu'il est soumis à un choc.

#### III.2.3.1 Essai de traction [3]

L'essai de traction est le plus fondamentale parmi tous les essais mécaniques. Il sert à déterminer les principales caractéristiques mécaniques telles que le module d'élasticité, le coefficient de Poisson, la limite d'élasticité, la résistance à la rupture, l'allongement après rupture et le coefficient de striction.

Son exécution est facile et les résultats obtenus servent à dimensionner toutes sortes des pièces allant d'un pignon microscopique jusqu'à la structure métallique d'un grand hall. Dans la recherche on l'applique pour la caractérisation de nouveaux matériaux et dans industrie pour les contrôles périodiques servant à surveiller la qualité des alliages, des polymères et des céramiques.

Le principe de cet essai est de soumettre une éprouvette normalisées à une extension progressive dans le sens de la longueur jusqu'à obtention de la rupture.

La machine utilisée pour effectuer les essais de traction sur nos éprouvettes est une machine de marque **zwick/Roell** (laboratoire Boumerdes, Figure III.15) pilotée par microordinateur. Les essais sont réalisés sur des éprouvettes normalisées (Figure III.16) à température ambiante. Nous récupérons des courbes contraintes /déformations.



**Figure III 15** Machine de traction de marque zwick/Roell



**Figure III 16** Epreuve de traction

### III.2.3.2 Essai de flexion [8]

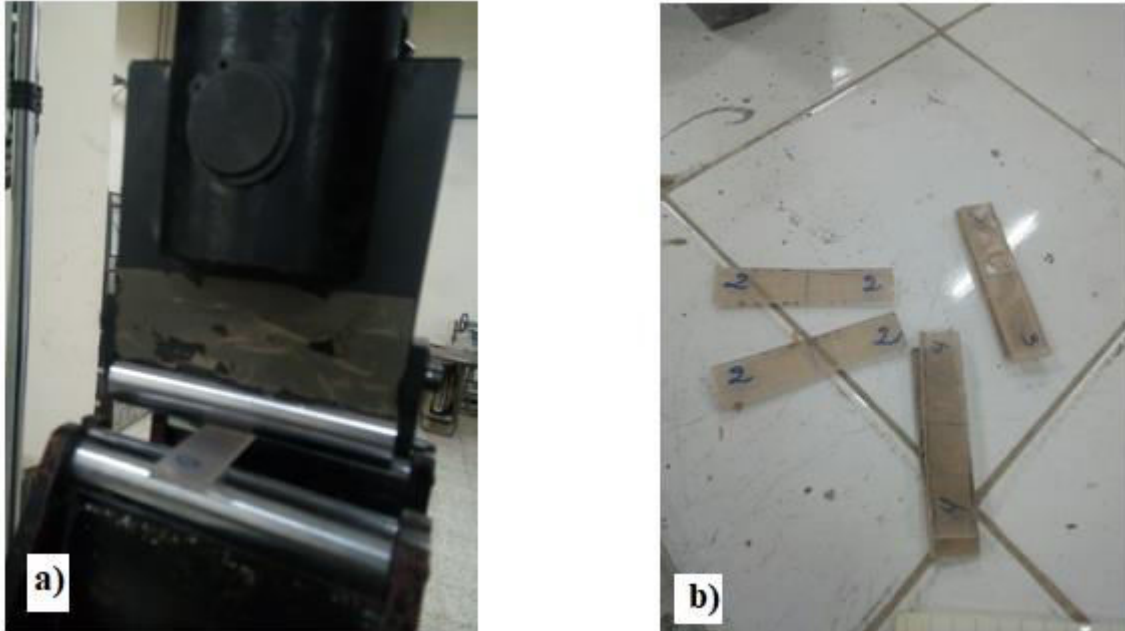
L'essai de flexion est un test mécanique statique qui fait partie de la famille des essais indépendants du temps. La simplicité du montage de l'éprouvette et de sa géométrie, le rend facile à mettre en œuvre. Il nous permet d'extraire la contrainte et la flèche à la rupture ainsi que le module de Young en flexion. Pour cet essai deux configurations qui peuvent être retenues : essai de flexion trois points et essai de flexion quatre points. La machine utilisée est une machine de traction IBERTEST (laboratoire pédagogique de Génie Civil).



**Figure III 17** machine de traction IBERTEST

### III.2.3.2.1 Essai de flexion trois points [8]

Cet essai consiste à imposer une déformation (ou *flèche*) à une éprouvette normalisée (barreau rectangulaire) placé sur deux appuis, à l'aide d'un poinçon se déplaçant à vitesse constante à une distance des deux appuis, puis on mesure la force qu'oppose l'éprouvette à cette déformation.



**Figure III. 18 Essai de flexion trois points**

**a) Déroulement de l'essai    b) éprouvette normalisée pour l'essai de flexion**

### III.2.3.3 Essai de dureté [15]

La classification des matériaux selon le critère de dureté se fait à travers des tests de dureté, répondants à des normes bien déterminées. Il existe plusieurs duretés :

La dureté de Mohs, la dureté Brinell, la dureté Vickers ; la dureté Knoop et la dureté Rockwell B et C.

Sur nos échantillons, nous allons effectuer des tests de dureté Vickers ainsi que des tests de micro dureté Vickers.

La norme de dureté Vickers a été adoptée en 1952 et celle de micro dureté en 1969.

#### III.2.3.3.1 Dureté Vickers : [15]

La dureté Vickers a été conçue dans les années 1920 par les ingénieurs de la société Vickers en Angleterre. Elle est caractérisée par l'empreinte faite par un indenter sous une charge donnée durant 15 secondes. L'indenter est formé d'une pyramide en diamant à base carrée dont les faces opposées font un angle de  $136^\circ$ . La charge appliquée est comprise entre 1 et

120 kgf. Le côté de l'empreinte est de l'ordre de 0,5 mm, la mesure s'effectuant à l'aide d'un microscope.

La dureté Vickers (**HV**) est calculée e à l'aide de la formule suivante :

$$HV = \frac{1,854F}{D^2} \quad (III. 2)$$

Où :

F est la charge appliquée en kgf et D, la diagonale de l'empreinte en millimètres.

La profondeur de pénétration H est  $H = \frac{D}{7}$  (III. 3)

La figure III.19 présente le duromètre utilisé pour nos échantillons, les essais étant effectués au niveau du laboratoire matériaux à l'entreprise EI de Azazga.



**Figure III. 19 Durometre**

### III.2.3.3.2 La microdureté :

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

Les essais de microdureté 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 microdureté à l'aide d'un programme placé sur l'appareil. Le microduromètre utilisé est représenté sur la figure III.20.



**Figure III. 20 Micro durometre**

#### III.2.3.4 Essai de résilience [16]

Il arrive souvent que les matériaux, de très bonnes qualités plastiques sous les efforts statiques, deviennent très fragiles sous l'action du choc. La résilience caractérise la résistance au choc des matériaux. C'est une caractéristique mécanique importante.

L'énergie consommée pour rompre le barreau est mesurée en faisant la différence d'énergie potentielle entre la hauteur de chute du « mouton » et celle à laquelle il remonte après avoir rompu le barreau. Si ce dernier était complètement fragile, le « mouton » remonterait à la même hauteur que celle d'où il a chuté ; s'il était au contraire extrêmement tenace, il ne serait pas rompu et le pendule ne remonterait pas du tout. L'énergie de rupture ainsi déterminée s'appelle la résilience  $J/cm^2$ . Plus elle est élevée, plus le matériau est tenace.

Le tableau ci après représente quelques caractéristiques du mouton pendule utilisé

**Tableau 6 : Fiche technique du mouton pendule**

Données techniques	Grand model	Petit model
Numéro modèle	Zwick 5101	Zwick 5102
Longueur du pendule	390mm	225mm
Capacité de travail	0...50/25/15/7,5 joule	0...4/2/1/0,5 joule
Vitesse d'impact	3,85m/s	2,93m/s



**Figure 21: Mouton pendule (machine d'essai de résilience)**

### **Conclusion :**

Pour chacune des caractéristiques d'un matériau, plusieurs méthodes sont disponibles pour la déterminer ; chacune a ses avantages et ses inconvénients. Le choix d'une de ces méthodes se fait selon le type de matériau, le type des résultats attendus de l'essai et les moyens disponibles.

Les résultats obtenus à partir de ces différents essais font l'objet du chapitre suivant.

# *Chapitre IV*

*Résultats et Discussion*

### Introduction

Nous avons élaboré des éprouvettes en matériaux composites avec une résine polyester et différents renforts (des mats de verre de 100 et 600, des fibres tissées (tissu) et des charges de cuivre), l'élaboration s'est faite par moulage en contact. Nous avons élaboré des éprouvettes normalisées de traction de flexion de résilience. Nous avons fait subir à nos échantillons des tests de densité et de calcination. Des observations au microscope optique et au microscope électronique à balayage ont été menés à fin de comprendre les phénomènes microscopiques qui se déroulent et qui gouvernent les phénomènes macroscopiques du comportement mécanique en traction et flexion ainsi que de résilience de nos échantillons.

Dans ce chapitre nous allons donner les résultats de ces différents tests ainsi que les discussions qui en découleront.

### IV.1. Eprouvettes élaborées

Des éprouvettes en matériaux composites sont élaborées, dans un premier lieu on s'est intéressé à l'influence du renfort sur le comportement physico-chimique et mécanique du matériau composite ; des couches de fibre de même nature (fibre de verre), mais la géométrie variable, nous avons utilisé une fibre sous forme de mat 100, et 600 et des fibres sous forme de tissu. En un deuxième lieu, on s'intéresse à l'influence de la charge sur le comportement du matériau composite ; on élabore les mêmes éprouvettes que précédemment en leur ajoutant une poudre de cuivre à des taux variant de 5%, 10% et 15%.

### IV.2 Résultats de la caractérisation mécanique

Nous allons présenter dans ce qui suit les résultats des essais de traction, flexion, de résilience ainsi que les résultats de la dureté et de la micro dureté.

#### IV.2.1 Résultats des essais de traction

##### IV.1.2.1 Analyse des courbes contraintes déformations

Les éprouvettes de matériau composite sont élaborées par procédé de moulage au contact, les dimensions des éprouvettes de traction sont données dans le tableau IV.1 ci-dessous.

**Tableau IV.1 : Dimensions (en mm) des éprouvettes de traction, selon ISO 527**

Matériau	Dimensions	Valeurs
Type III	longueur minimale	250
	Distance initiale entre mors	136
	Longueur de référence (extensomètre)	50+-1
	Distance entre talons	150+-1
	Largeur de la partie calibrée	25ou50+-0,5

Nous allons considérer dans ce qui suit les courbes contraintes /déformations obtenues après les essais de traction sur nos éprouvettes.

Les essais de traction sont effectués uniquement sur les matériaux composites renforcés mais non chargés, les essais se déroulent à température ambiante.

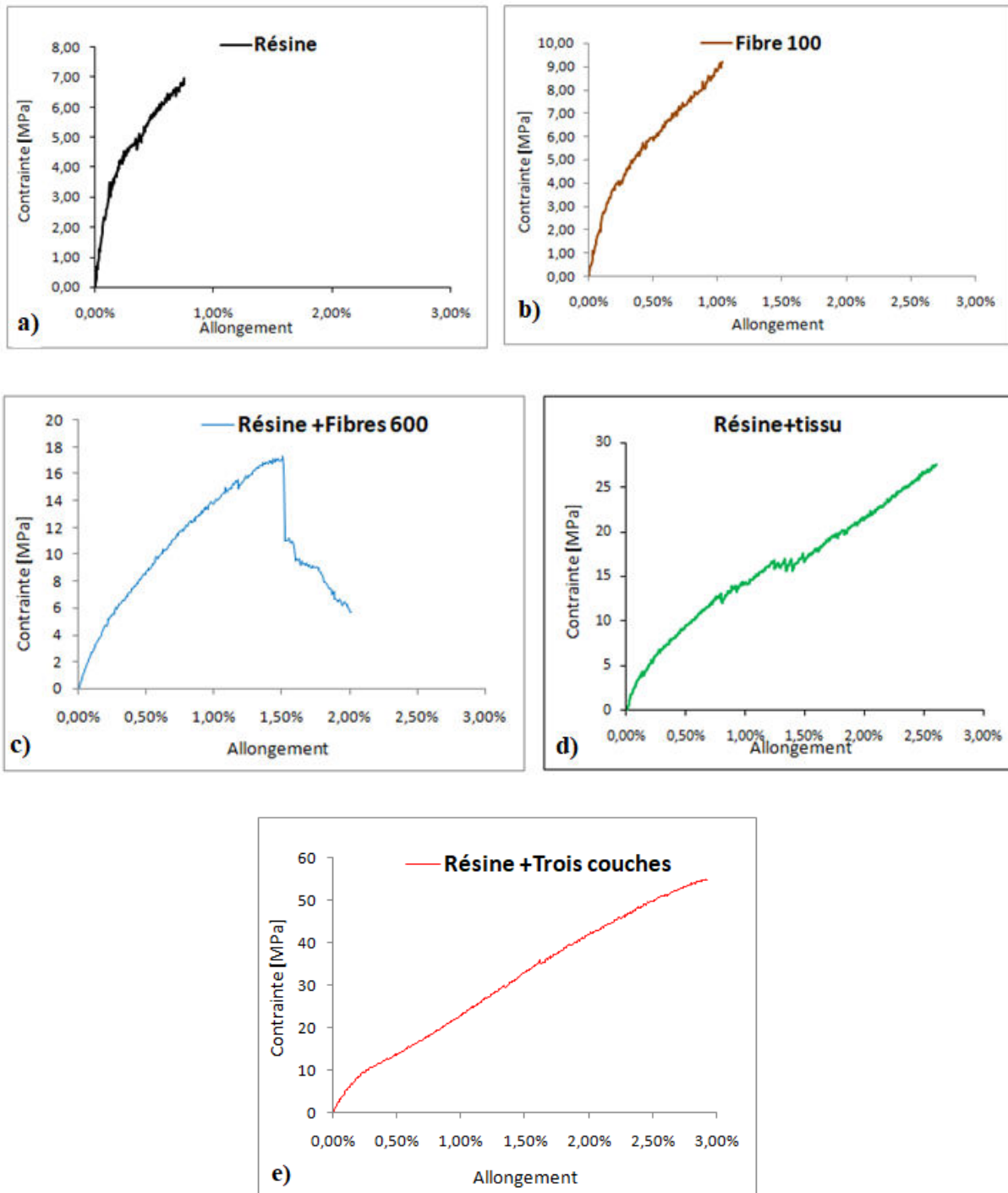
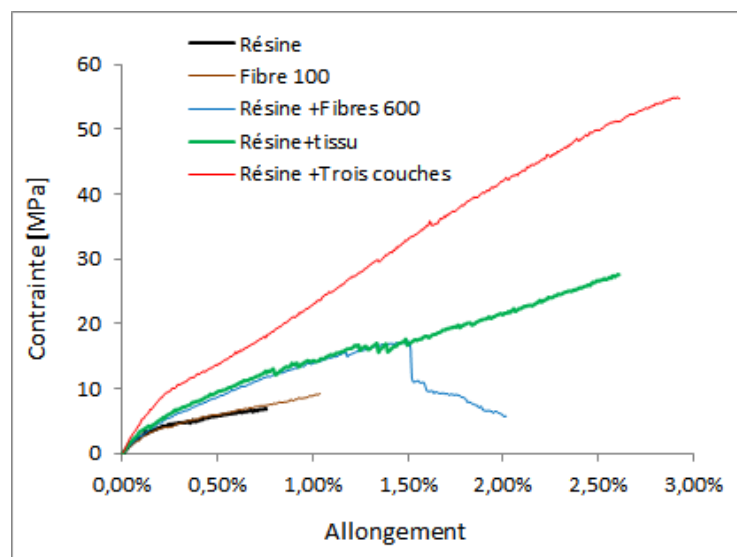


Figure IV.1 Courbes contraintes /déformations : a) résine seule, b) résine + fibre mat de 100), c) résine+fibre mat 600, d) résine + fibre tissu, e)résine+toutes les couches de fibres

- la courbe contrainte déformation de la **résine seule**, illustrée par la **figure IV.1 a)** montre un comportement fragile de la résine polyester; la déformation ne dépasse pas une valeur de 0,76% sous une contrainte de 6,78 MPa.
- la courbe contrainte déformation de la **résine** renforcée en fibre de verre de nature mat de 100, illustrée par la **figure IV.1 b)** montre une courbe de même allure que celle de la résine seule; le comportement demeure fragile et la déformation ne dépasse pas 1,04% sous une contrainte de 9,22 Mpa (la fibre de verre de forme mat de 100, n'a rien amélioré dans le comportement mécanique de la résine polyester, du point de vu comportement en traction)
- la courbe contrainte déformation de la **résine+fibre mat de 600**, illustrée par la **figure IV.1 c)** montre que l'éprouvette renforcée supporte une contrainte plus importante (17,3MPa) certaines fibres cèdent en point avec 1,5% de déformation, mais l'éprouvette n'est rompue qu'au bout de 2% de déformation.
- la courbe contrainte déformation de la **résine+fibre tissu**, illustrée par la **figure IV.1 d)** montre que cette fois la contrainte maximum supporté par le matériau composite est de 27,5MPa (4 fois la résistance de la résine seule), la déformation atteint 2, 61%.
- la courbe contrainte déformation de la **résine+les trois couches de fibres** illustrée par la **figure IV.1 e)** montre un comportement toujours fragile du M.C mais une résistance important allant jusqu'à 54,7MPa, soit 8 fois la résistance de la résine.

Sur la figure IV.2 nous rassemblons toutes les courbes contraintes déformation pour les M.C élaborés.



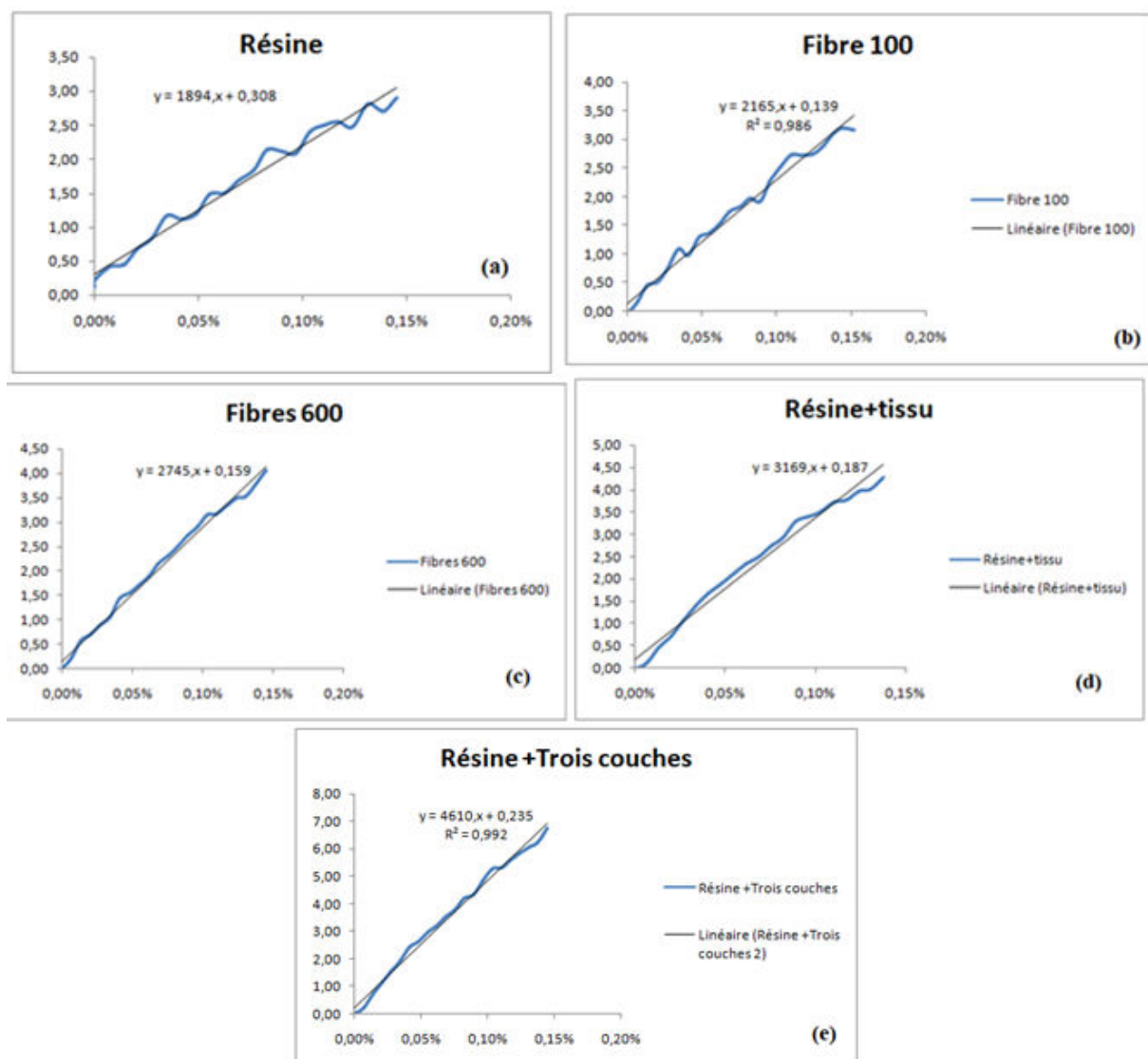
**Figure IV.2 Courbes contraintes /déformations :  
résine renforcée avec toutes les couches de fibre**

- La figure IV.2 est une superposition des courbes a), b), c), d) et e) de la figure IV.1 ou nous constatons que le comportement mécanique de la résine seule est le même que celui de la résine renforcée en fibre mat de 100, donc cette fibre (mat de 100) n'apporte aucune amélioration au MC. La

résine renforcée en fibre mat de 600, et en fibre tissées en deux courbes qui se superposent : la fibre mat de 600 joue le même rôle que la fibre tissée dans le renforcement du matériau composite. La superposition de toutes les couches de fibres dans le matériau composite nous donne un comportement mécanique important dont la résistance limite à la traction est 8 fois plus grande que celle de la résine seule.

#### IV.1.1.2 Analyse des modules d'élasticité en traction

On s'intéresse à la partie linéaire des courbes contraintes déformations précédentes et on tire le module d'élasticité, comme montré dans les courbes ci-dessous de la figure IV.3 ; les résultats sont regroupés dans le tableau IV.2 qui suit.



**Figure IV.3 Courbes de tendance pour la détermination du module d'élasticité**

a) Résine seule, b) résine renforcée en fibre mat 100, c) résine renforcée en fibre mat 600, d) résine renforcée en fibre tissu, e) résine renforcée avec toutes les fibres

Tableau IV2. Valeurs des modules d'élasticité des M.C élaborés

Matériau composite	Module d'élasticité (MPa)	remarque
Résine seule	1894	$E_1$
résine renforcée en fibre mat 100	2165	<b>1,14 fois <math>E_1</math></b>
résine renforcée en fibre mat 600	2745	<b>1,44 fois <math>E_1</math></b>
résine renforcée en fibre tissu	3169	<b>1,67 fois <math>E_1</math></b>
résine renforcée avec toutes les fibres	4610	<b>2,83fois <math>E_1</math></b>

L'effet du renfort sur la résine est croissant selon l'ordre établi des couches de fibre de verre, l'influence de la fibre 100 est presque insignifiante, alors qu'elle augmente pour la fibre de 600 et plus encore pour le renfort en tissu. Lorsqu'on superpose toutes les couches de renfort, on obtient un matériau composite dont le module est presque égal à trois fois la valeur du module de la résine.

#### IV.2.2 Résultats des essais de flexion

On a effectué l'essai de flexion sur les éprouvettes en matériau composite élaborées avec la résine sans la chargée de poudre de cuivre, puis nous avons fait l'essai pour les éprouvettes dont la résine est mélangée avec la poudre de cuivre.

Tableau3 : dimensions (en mm) des éprouvettes de flexion trois points, selon ISO 14125

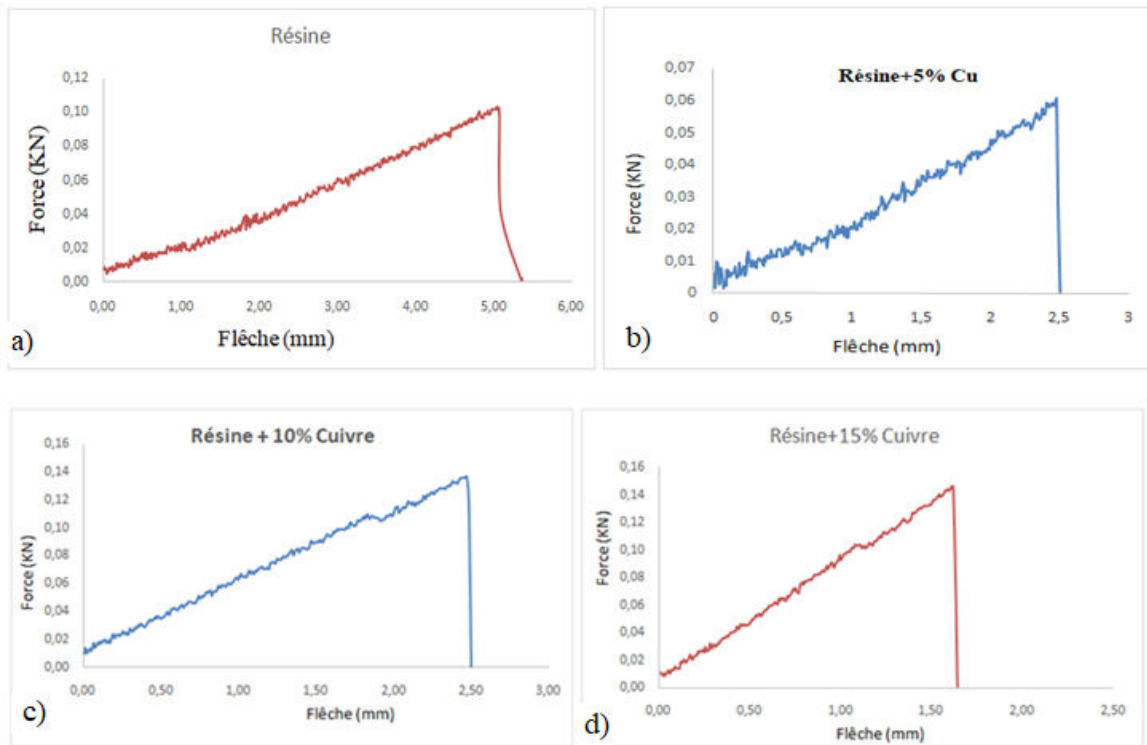
Matériau	Longueur l	Distance entre appuis L	Largeur L	Epaisseur h
Type III	80	64	15	4

#### IV.1.2.1 Analyse des courbes force flèche en flexion

Nous avons effectué des essais de flexion sur nos échantillons.

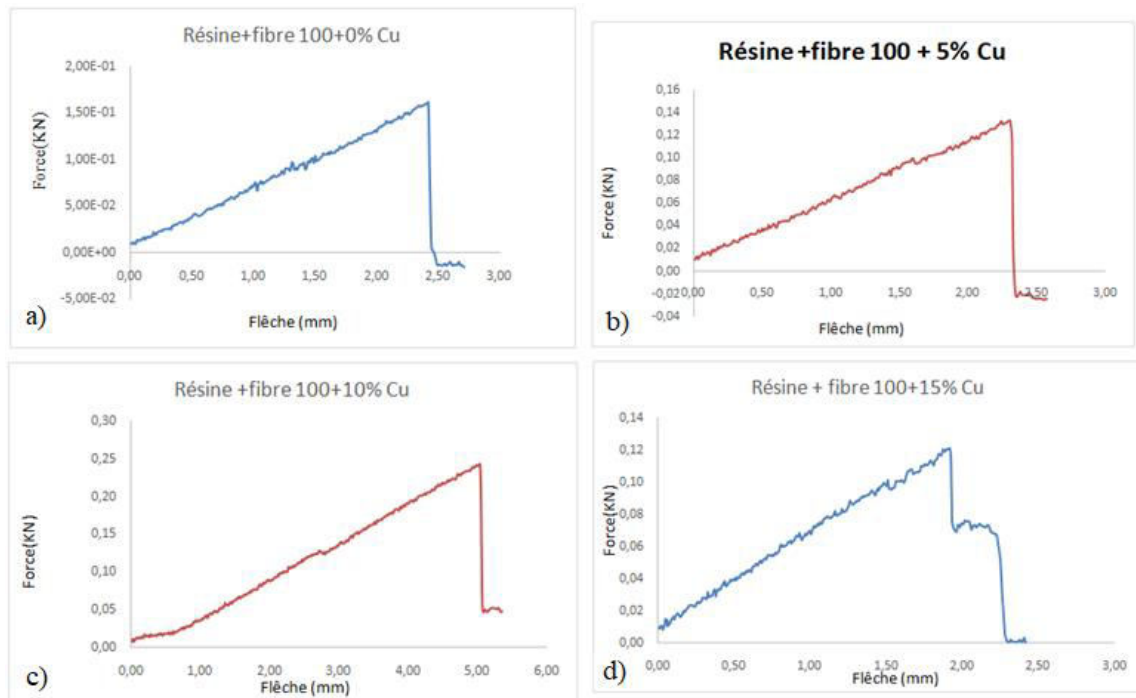
- Nous remarquons en observant la figure IV.4 ci dessous, que l'ajout du cuivre comme charge a fragilisé la résine, la flèche atteint une valeur de 6,8 mm sous une force de 110N (figure IV.4 a)) pour la résine seul, et chute à la valeur de 2,5 mm sous une force de 60N, pour la résine chargée en 5% (figure IV.4b)), et 10% Cu (figure IV.4 c)) ou la charge est de 140N, et chute à une valeur de 1,2mm sous une force de 140N lorsque la résine est chargée de 15% en Cu (figure IV.5 d))

- Sur la figure IV.5, on remarque une bonne résistance en flexion pour le matériau composite élaboré en résine et fibre mat de 100, chargé à 10% de Cu, ou la flèche atteint la valeur de 5mm sous une charge de 250N (figure IV.5 c)).pour les autre échantillons la flèche demeurent au environ de 2,5 mm.



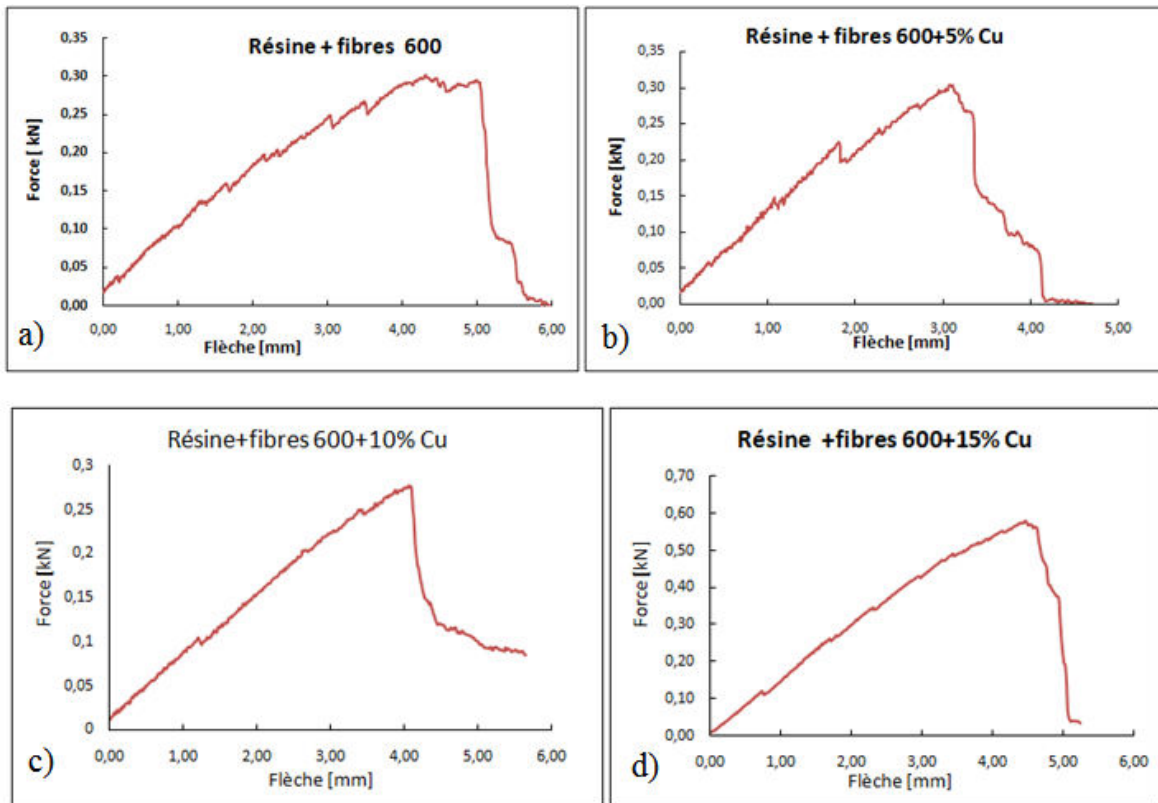
**Figure IV.4 Courbe de flexion de la Résine seule**

a) Résine seule, b) résine +5% Cu, c) résine + 10 % Cu, d) résine + 15%Cu



**Figure IV.5 courbe de flexion Résine + mat 100**

a) Résine + fibre100, b) Résine + fibre100 +5% Cu, c) Résine + fibre100+ 10 % Cu, d) Résine + fibre100 + 15%Cu



**Figure IV.6 courbe de flexion Résine +Fibre mat 600**

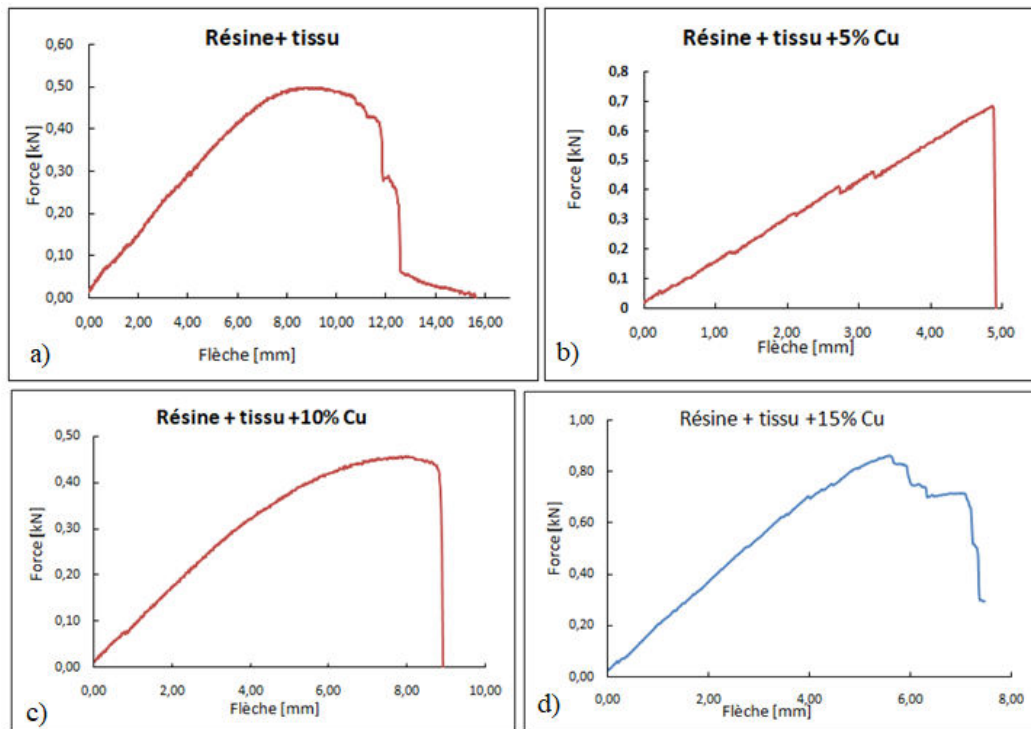
- a) **Résine + fibre600**, b) **Résine + fibre600 +5% Cu**, c) **Résine + fibre600+ 10 % Cu**,  
 d) **Résine + fibre600 + 15% Cu**

- La figure IV.6, représente les matériaux composite élaboré avec la fibre mat de 600, nous remarquons que tous les échantillons sont résistant en flexion car les résistances en flexion atteignent des valeurs : 300N pour la résine plus fibre, 600 pour le MC chargé à 15% de Cu.

- La figure IV.7, représente le matériau composite élaboré en résine plus fibre tissée, ces échantillons présentent des résistances très importantes : 500N avec une flèche de 15 mm pour le matériau composite sans charge ; le matériau composite chargé à 5% de cuivre

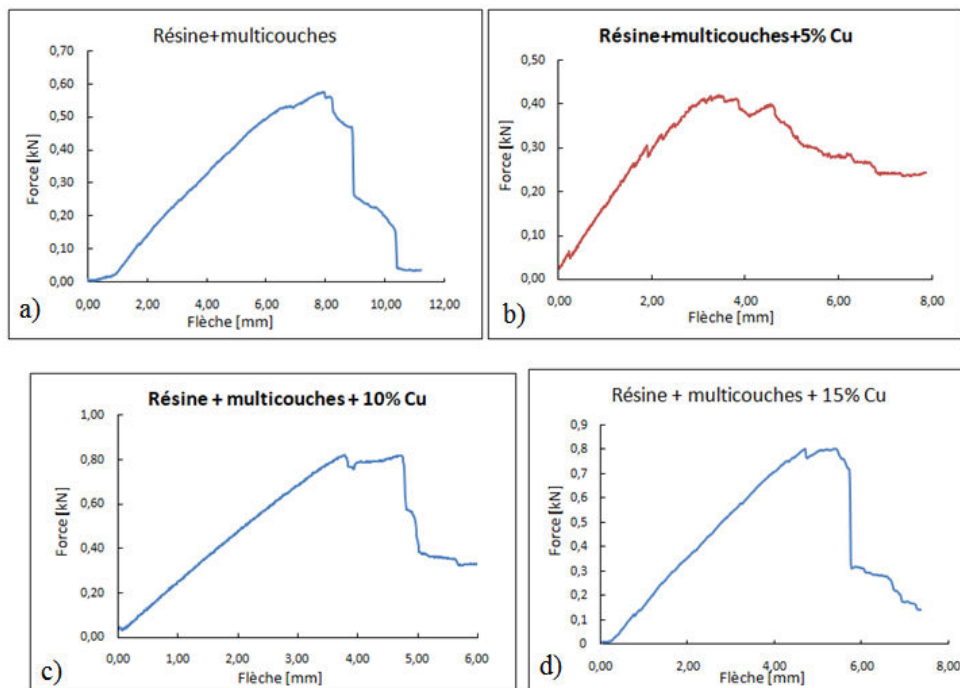
- La figure IV.8, représente le comportement mécanique en flexion, du matériau composite, multicouches, élaboré avec toutes les couches de fibres.

Le matériau composite est très résistant, car la flèche est importante et la charge est importante aussi. Pour le MC non chargé la force est de 800N et la flèche est de 16mm, l'ajout de 5% de Cu % fait diminuer la résistance et la déformation elles deviennent respectivement 400N et 8mm. L'ajout de 10% et 15% de Cu maintient la résistance à la valeur de 800N mais diminue la flèche jusqu'à 8mm.



**Figure IV.7** courbe de flexion Résine +Fibre tissu

- a) Résine + fibre tissu, b) Résine + fibre tissu +5% Cu, c) Résine + fibre tissu+ 10 % Cu,  
d) Résine + fibre tissu + 15% Cu



**Figure IV.8** courbe de flexion Résine +toutes les fibres

- a) Résine + toutes les fibres, b) Résine + toutes les fibres +5% Cu  
c) Résine + toutes les fibres + 10 % Cu, d) Résine + toutes les fibres + 15% Cu

#### IV.2.2.2 Analyse des valeurs des contraintes maximales et des déformations (flèches)

A partir des données des courbes de flexion on calcule la contrainte maximum et la flèche des matériaux composites que nous notons dans le tableau IV.4

**Tableau IV4 Valeurs de la contrainte max et de la flèche du matériau composite élaboré.**

Matériau Composite	Contrainte Max (MPa)	Remarque	Flèche (mm <sup>2</sup> )	Remarque
<b>Résine seule</b>	38,7		5,37	
Résine + 5% cuivre	22,8	-	2,83	-
Résine + 10% cuivre	88,1	++	4,74	-
Résine + 15% cuivre	56,4	+	2,5	--
<b>Résine + fibre 100</b>	38,8		2,04	
Résine+fibre100+5%Cu	49,7	+	2,58	+
Résine+fibre100+10% Cu	91.1	++	5,36	++
Résine+fibre100+15% Cu	45.5	+	2,08	
<b>Résine + fibre 600</b>	188.2		6.31	
Résine+fibre 600+ 5% Cuivre	113.7	-	5.33	-
Résine + fibre 600+ 10% Cuivre	104.3	-	5.65	-
Résine + fibre 600+ 15% Cuivre	217.4	+	5.24	-
<b>Résine + tissu</b>	112.8		6.4	
Résine + tissu+ 5% Cuivre	257.6	++	5.31	-
Résine +tissu+ 10% Cuivre	171.1	+	9.18	+
Résine + tissu+ 15% Cuivre	323.6	+++	7.41	+
<b>Résine +multicouches</b>	216.2		11.19	
Résine +multicouches+ 5% Cuivre	157.4	-	7.86	-
Résine+multicouches+ 10% Cu	294.1	+	9.03	-
Résine+multicouches+ 15% Cu	282.6	+	5.78	--

##### IV.2.2.2.1 Analyse de la variation de la contrainte maximale

Nous allons considérer en premier lieu l'influence du renfort sur la résistance maximale du matériau composite, en comparant la résistance de la résine vierge avec celle des matériaux composite renforcés avec les différentes couches (fibre mat de 100, fibre mat de 600, fibre tissée et l'assemblage de toutes ces couches). En second lieu, nous allons considérer l'influence de la charge de cuivre sur la résistance maximale du matériau composite ; cette fois pour un renfort fixe, nous étudierons la variation de la résistance en fonction du pourcentage de charge de cuivre dans le matériau composite considéré.

**Analyse de l'influence de la fibre sur la contrainte maximale**

- 1) La contrainte maximale de **la résine seule** (sans renfort) est de 38,7 MPa, c'est la même valeur que dans le cas du matériau composite renforcé en fibre **mat de 100**, en conclu que cette fibre n'est utilisée dans un but mécanique d'apporter une résistance au matériau mais simplement pour un but esthétique.
- 2) La contrainte maximale du matériau composite renforcé en fibre **mat de 600** a une valeur de 188,2MPa soit 4,8 fois (~5 fois) la résistance de la résine, cette fibre joue le rôle de renfort du matériau composite.
- 3) La contrainte maximale du matériau composite renforcé en **fibre tissées** à une valeur de 112 MPa, soit presque 3 fois la résistance de la résine, cette fibre joue le rôle de renfort du matériau composite.
- 4) En appliquant toutes **les couches de fibre** à notre matériau composite, la résistance atteint la valeur de 216,2 MPa soit 6 fois la résistance de la résine.

**Analyse de l'influence de la charge de cuivre sur la contrainte maximale**

- 1) Pour la **résine vierge**: l'ajout de 5% de Cu diminue la résistance mécanique de 38,7 MPa jusqu'à 22,8MPa de 1,5fois (presque de moitié), par contre l'ajout de 10% et 15% influence positivement la résistance maximale, elle augmente jusqu'à 88,1MPa (soit 2,3 fois) pour la première charge (5% Cu) et jusqu'à 56,4MPa (1,4 fois) pour la charge de 15% de cuivre.
- 2) Pour le composite renforcé **fibre mat de 100** : l'ajout de la charge de Cu avec tous pourcentages confondu est bénéfique à la résistance maximale du matériau composite, en effet l'ajout de 5% augmente la résistance max de 38,8 MPa jusqu'à 49,7 MPa soit 1,3fois, pour la charge 10% Cu, la résistance max augmente jusqu'à 91,1 MPa soit 2,4 fois, et pour la charge 15% Cu la résistance max atteint la valeur de 54,5MPa soit 1,4 fois.
- 3) Pour le composite renforcé **fibre mat de 600** : la résistance max augmente dans le cas de la charge avec 15% de Cu, ou elle varie de 188,2 MPa à 217,4MPa soit une augmentation de 1,15 fois, la charge de 5% diminue la résistance jusqu'à 113,7 MPa, la charge de 10% diminue la résistance jusqu'à 104,3 MPa.
- 4) Pour le composite renforcé **fibre tissées** : seule la charge de 15% de Cu augmente la résistance max de 188,2 MPa jusqu'à 217,4 MPa soit 1,15 fois.
- 5) Pour le composite renforcé avec **toutes les couches de fibres** : seule la charge 5% diminue la résistance.

**IV.2.2.2.2 Analyse de la variation de la flèche**

Nous procédons de la même manière que pour l'analyse de la contrainte max, nous commençons par l'influence de la couche de fibre, par la suite en s'intéressera à l'influence de la charge en cuivre.

**Analyse de l'influence de la fibre sur la flèche du matériau composite**

La flèche du matériau composite, est sa déformation en flexion, est influencée par la nature de la couche de fibre utilisée pour renforcer le matériau composite :

La fibre mat de sens diminue la flèche (de 5,37 mm à 2,04 mm), la fibre mat de 600 fait augmenter la flèche jusqu'à 6,3 mm ainsi que la fibre tissée, qui l'augmente jusqu'à 6,4mm, en fin la superposition de toutes les couches de fibre nous donne une flèche de 11,19 soit 2,1 fois la flèche de la résine.

**Analyse de l'influence de la charge de cuivre sur la flèche du matériau composite**

- 1) **La résine vierge** : l'ajout de la charge a diminué la flèche, on dit que la charge a accentué la fragilisation de la résine.
- 2) Pour le composite renforcé **fibre mat de 100** : la flèche du matériau composite initialement de 2,04mm s'est vue augmentée avec l'ajout de la charge. La flèche passe à 2,58 avec l'ajout de 5%, à 5,36mm avec la charge de 10% , mais ne change presque pas avec la charge de 15% ( 2,04mm au lieu de 2,04mm).
- 3) Pour le composite renforcé **fibre mat de 600** : une légère diminution de la flèche est constatée avec l'ajout des charges 5%, 10% et 15% de Cu, elle passe de 6,31mm à 5,33mm, 5,65mm et 5,24mm avec les charges de cuivre respectivement de 5%, 10% et 15%.
- 4) Pour le composite renforcé **fibre tissées** : la flèche augmente avec les taux de charges de 10% et 15% elle atteint respectivement les valeurs de 9,18mm et 7,41mm. La charge de 5% diminue la flèche jusqu'à 5,31mm ;
- 5) Pour le composite renforcé avec **toutes les couches de fibres** : l'ajout de la charge a tendance à diminuer la flèche, elle passe de 11,19mm, pour le composite non chargé, à 7,86 mm, 9,03 mm et 5,78 mm pour les multicouches chargées respectivement 5%, 10% et 15%.

## IV.2.3 Résultats des essais de résilience

Nous résumons les résultats obtenus pour l'essai de résilience de nos échantillons dans le tableau IV.3 suivant :

Tableau IV.5 Résilience des matériaux composites élaborés

<b>Matériau composite</b>	<b>Résilience J/Cm<sup>2</sup></b>
Résine seule	1,73*10 <sup>-1</sup>
résine +fibre 100	8,06*10 <sup>-1</sup>
résine +fibre tissu	2,83
résine +fibre 600	3,41
résine +toutes les fibres	9,2
<b>Matériau composite +5% Cu</b>	<b>Résilience J/Cm<sup>2</sup></b>
Résine +5%	1,23*10 <sup>-1</sup>
résine +fibre 100+5%	6,7*10 <sup>-1</sup>
résine +fibre tissu +5%	1,75
résine +fibre 600+5%	6,1
résine +toutes les fibres +5%	14,7
<b>Matériau composite +10% Cu</b>	<b>Résilience J/Cm<sup>2</sup></b>
Résine +10%	1,1*10 <sup>-1</sup>
résine +fibre 100+10%	7,05*10 <sup>-1</sup>
résine +fibre tissu +10%	2,09
résine +fibre 600+10%	7,98
résine +toutes les fibres +10%	6,4
<b>Matériau composite +15% Cu</b>	<b>Résilience J/Cm<sup>2</sup></b>
Résine +15%	1,62*10 <sup>-1</sup>
résine +fibre 100+15%	3,4*10 <sup>-1</sup>
résine +fibre tissu 2+15%	4,12
résine +fibre 600+15%	5,87
résine +toutes les fibres +15%	8,35

➤ **L'influence de la couche de fibre sur la résilience du matériau composite élaboré :**

La résilience du matériau composite est influencée par la nature de la couche de fibre qui lui sert de renfort ; la résilience varie de 0,173 J/cm<sup>2</sup> pour la résine seule, de 0,806 J/cm<sup>2</sup> pour la résine renforcée en fibre mat de 100, elle vaut 2,83 J/cm<sup>2</sup> pour la résine renforcée avec un tissu, et atteint la valeur de

3,41 J/cm<sup>2</sup> pour le matériau composite résine plus fibres mat de 600. Lorsqu'on ajoute toutes les couches à la résine, sa résilience atteint 9,2 J/cm<sup>2</sup> soit 53 fois plus résilient.

➤ **L'influence de la charge de cuivre sur la résilience du matériau composite élaboré**

L'ajout des particules de cuivre comme charge n'influent pas sur la résilience de la résine seule. Les charges influent sur la résilience du matériau composite, surtout dans le cas du renfort fibre mat 600 ou la résilience passe de 3,41 J/cm<sup>2</sup> à 6,1 J/cm<sup>2</sup> avec un ajout de 5% de Cu, même influence dans le cas du composite renforcé avec toutes les couches et chargé de 5% de Cu sa résilience passe de 9,2 J/cm<sup>2</sup> à 14,7 J/cm<sup>2</sup>.

#### IV.2.4 Résultats des essais de dureté

Nous résumons les résultats obtenus pour l'essai Vickers dans le tableau IV.6 ci-dessous.

**Tableau IV.6 Résultat de l'essai de dureté Vickers**

<b>Matériau composite</b>	<b>Dureté Vickers (HV)</b>
Résine seule	13,10
résine +fibre 100	13,77
résine +fibre tissu	14,64
résine +fibre 600	13,10
résine +toutes les fibres	15,10
<b>Matériau composite +5% Cu</b>	<b>Dureté Vickers (HV)</b>
Résine +5%	27,82
résine +fibre 100+5%	28,96
résine +fibre tissu +5%	28,56
résine +fibre 600+5%	28,01
résine +toutes les fibres +5%	28,18
<b>Matériau composite +10% Cu</b>	<b>Dureté Vickers (HV)</b>
Résine +10%	27,54
résine +fibre 100+10%	28,96
résine +fibre tissu 2+10%	28,77
résine +fibre 600+10%	28,98
résine +toutes les fibres +10%	33,92
<b>Matériau composite +15% Cu</b>	<b>Dureté Vickers (HV)</b>
Résine +15%	25,996
résine +fibre 100+15%	27,01
résine +fibre tissu 2+15%	27,46
résine +fibre 600+15%	28,96
résine +toutes les fibres +15%	28,80

➤ **Influence de la couche de fibre sur la dureté du matériau composite élaboré :**

Les duretés relevées dans le cas du matériau composite sans charge sont de l'ordre de 13, 14 et 15 HV, valeurs proche de celle de la résine, on dira que le renfort n'augmente pas la dureté d'une manière significative, on peut estimer la dureté de la résine à 13HV et celle de la fibre à 15HV.

➤ **Influence de la charge de cuivre sur la résilience du matériau composite élaboré**

-L'ajout de 5% de Cu augmente la dureté de 13,10HV pour la résine seule jusqu'à 27,82 HV, Pour le MC formé de toutes les couches, la résilience augment de 15,10 HV à 28,18 HV lorsqu'on lui ajoute 5% de Cu. L'ajout du Cuivre augment significativement la dureté du composite.

- on ne note aucune amélioration de la valeur de dureté du composite lorsqu'il est chargé de 10% et de 15% Cu ; la valeur de dureté est toujours au voisinage de 28HV, ce qui peut suggérer que la dureté du cuivre est au voisinage de 28HV.

#### IV.1.5 Résultats des essais de micro dureté

La micro dureté est une technique de caractérisation qui cible les différentes phases existant dans le matériau (M.C), et donne une information sur la dureté de la phase. Nous avons effectué des essais de micro dureté Vickers avec un micro duro mètre, nous résumons les résultats obtenus dans le tableau IV.5 ci dessous

**Tableau IV.7 Résultat de l'essai de micro dureté Vickers**

Matériau Composite	Micro dureté (HV)	Remarques
Résine seule	16.5HV0.05	Résine
	17.7HV0.05	
	17.2HV0.05	
Résine +15% Cu	18.8HV0.05	Résine
	18.5HV0.05	
	31.4HV0.05	Cuivre
	33.9HV0.05	
Résine +5%Cu+ Fibre de tissu	28HV0.05	Cuivre
	24.9HV0.05	Cuivre
	22.8HV0.05	Cuivre
	19.8HV0.05	Résine
Résine +Fibre mat de 100	13.5HV0.05	Résine
	10.6HV0.05	Fibre
	6.11HV0.05	Fibre
	7.10HV0.05	Fibre

- L'essai de micro dureté appliqué aux échantillons de résine seule donne des valeurs de dureté variant entre 17,7 et 16,5, nous notons que la dureté de la résine est aux voisinages de ces valeurs.

- l'essai de micro dureté appliqué aux échantillons de résine plus 15% de cuivre nous donne deux plages de valeurs de dureté, la première est de (18,8-18,5) correspondant à la dureté de la résine ; la seconde valeur est (31,4-33,9) qu'on attribue à dureté du cuivre.

- l'essai de micro dureté appliqué aux échantillons de résine plus fibre mat de 100 nous donne deux valeurs distincts de la dureté : une valeur de 13,5 correspondant à la dureté de la résine ; la seconde valeur est (6,11-7,10-10,6) qu'on attribue à dureté de la fibre.

En résumé les essais de dureté et de micro dureté nous on permit de cibler la dureté des constituants de notre matériau composite qu'on donne comme suit :

La valeur de la dureté de la résine appartient à l'intervalle [13,1-18,8]

La valeur de la dureté du cuivre appartient à l'intervalle [22,8-33,9]

La valeur de la dureté de la fibre appartient à l'intervalle [6,11-10,6]

### IV.3 Résultats de la caractérisation chimique

Nous allons donner dans cette partie, les résultats obtenue durant l'essai de calcination, essai qui sert essentiellement pour la détermination du taux de charge dans un matériau composite.

#### IV.3.1 Résultats de la calcination

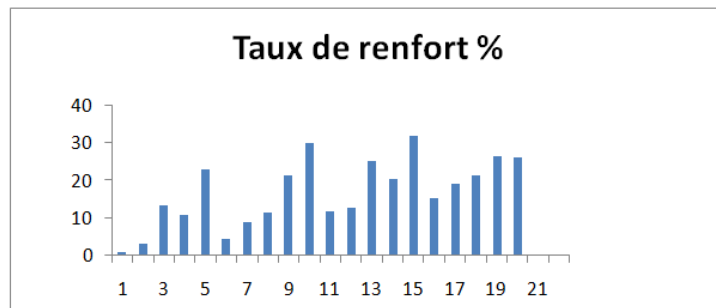
Après avoir mesuré les masses des échantillons avant et après calcination nous avons noté les résultats dans le tableau IV.6 ci-dessous.

**Tableau IV.8 : Résultats de l'essai de calcination**

Matériau composite	N°	Masse du creuset	Me avant calcination	Mc+e après calcination	Taux de charge %
Résine seule	1	34,0497	2,4280	34,0719	0,914
Résine+ mat de 100	2	37,9206	2,2651	37,9944	3,258
Résine+ tissu	3	34,9524	2,810	35,3264	13,309
Résine+ mat de 600	4	34,3406	3,3963	34,7065	10,773
Résine+ toutes les couches	5	38,6047	2,670	39,2206	23,067
Résine seule+5% Cu	6	34,4153	1,7272	34,4901	4,330
Résine+ mat de 100+5% Cu	7	36,0158	2,4564	36,2334	8,858
Résine+ mat de 600+5% Cu	8	36,0775	3,5906	36,4890	11,443
Résine+ tissu+5% Cu	9	37,3256	3,0588	37,8879	21,325

<b>Résine+toutes les couches+5% Cu</b>	10	37,5655	2,1452	38,2127	30,169
<b>Résine seule+10% Cu</b>	11	35,7592	2,9377	36,1027	11,693
<b>Résine+ mat de 100+10% Cu</b>	12	34,3494	2,7212	34,6948	12,692
<b>Résine+ mat de 600+10% Cu</b>	13	34,3069	3,2730	35,1291	25,121
<b>Résine+ tissu+10% Cu</b>	14	37,8329	4,4674	38,7484	20,493
<b>Résine+ toutes les couches+10% Cu</b>	15	19,3293	4,5873	20,7999	32,058
<b>Résine seule+15% Cu</b>	16	20,6688	3,8479	21,2556	15,243
<b>Résine+ mat de 100+15% Cu</b>	17	17,7288	3,4310	18,3850	19,126
<b>Résine+ mat de 600+15% Cu</b>	18	17,7819	1,9088	18,1898	21,369
<b>Résine+ tissu+15% Cu</b>	19	38,6053	3,3722	39,4993	26,511
<b>Résine+toutes les couches+15% Cu</b>	20	34,4827	3,8618	35,4922	26,141

A partir des résultats notés sur le tableau IV.8 nous traçons l'histogramme suivant donnant la valeur du taux de renfort pour chaque échantillon élaboré.



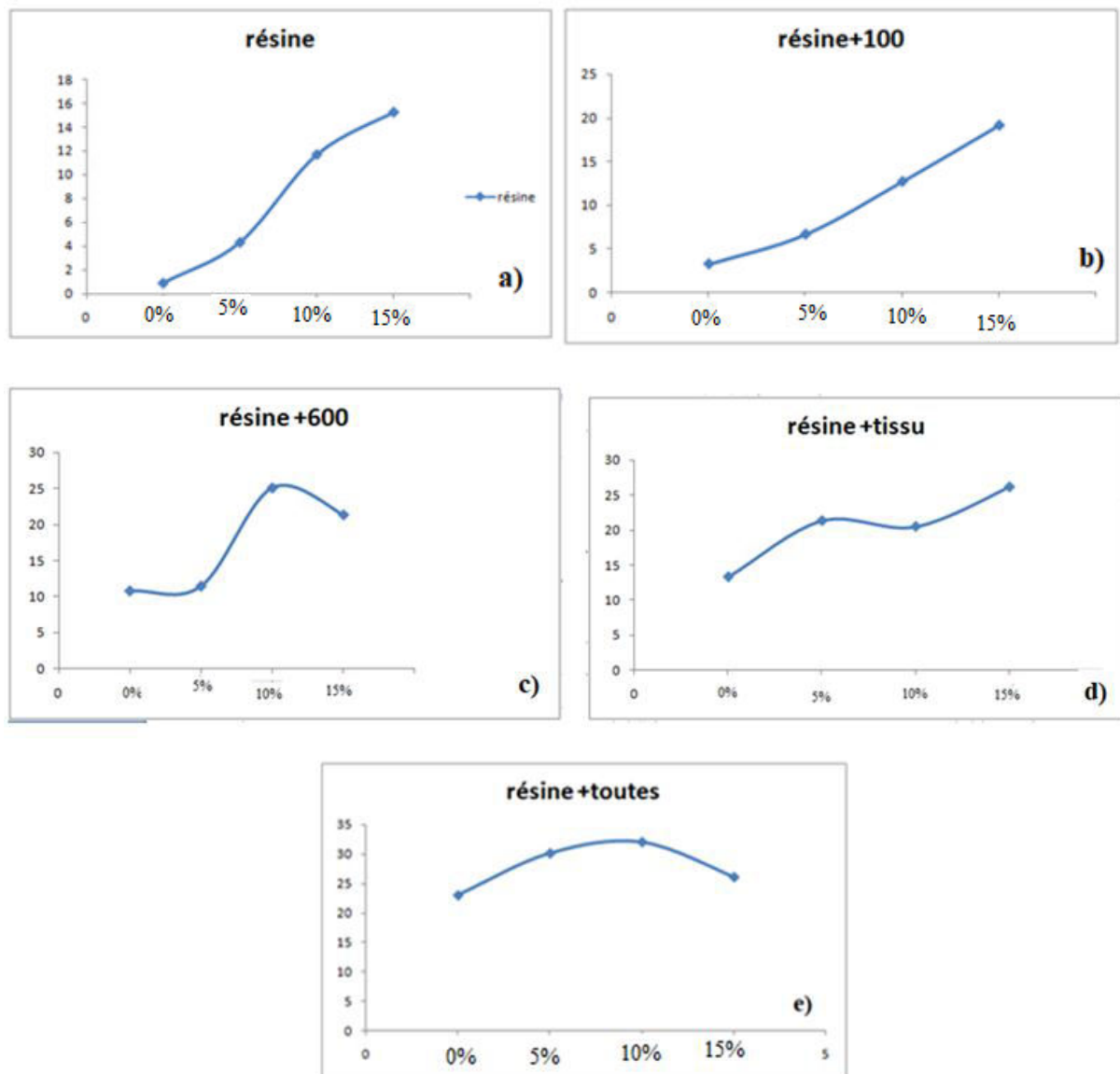
**Figure IV.1.9 Variation du taux de renfort dans le matériau composite élaboré**

### IV.3.2 Variation du taux de renfort avec la charge de Cuivre

On donne dans ce qui suit les courbes de variation du taux de renfort, dans le matériau composite, avec la variation de la charge de cuivre.

Les résultats de l'essai de calcination, comme représentés sur la figure IV.10, nous renseignent sur l'homogénéité du matériau composite élaboré. En effet pour la courbe IV.10 a) et la courbe IV.10 b) le résultat est cohérent, plus la quantité de cuivre augmente dans la résine et dans le composite résine plus fibre mat de 100, plus la quantité du résidu en cuivre et fibre augmente, cela indique une bonne répartition des particules de cuivre dans le MC. Pour les courbes IV.10 c) et VI.10 d) le dernier point de la courbe (chargé à 15% Cu) pose problème, car ce point est sensé avoir la plus grande valeur de résidu du fait qu'il possède la plus grande quantité de cuivre, mais sur la courbe il a une valeur de résidu inférieure à celle du composite chargé à 10%Cu. On considère dans ce cas que la répartition des

particules de cuivre n'est pas homogène dans la résine et par la suite, cette répartition n'est pas homogène aussi dans le matériau composite ainsi élaboré.



**Figure IV. 10** Variation du taux de renfort dans le matériau composite en fonction du Cuivre

#### IV.4 Résultats de la caractérisation physique

La caractérisation physique menée pendant notre étude consiste en un teste de densité, une observation microscopique avec un microscope optique et une observation en microscope électronique à balayage, nous exposons les résultats dans ce qui suit.

##### IV.4.1 Test de densité

Pour connaitre la répartition de densité de nos échantillons, nous avons effectué le test de densité, nous portons les résultats dans le tableau IV.7 ci-dessous.

Tableau IV.9 Résultats de l'essai de densité

Matériau composite	Densité
Résine seule	1,26
Résine+ mat de 100	1,26
Résine+ mat de 600	1,40
Résine+ tissu	1,30
Résine+ toutes les couches	1,42
Résine seule+5% Cu	1,29
Résine+ mat de 100+5% Cu	1,30
Résine+ mat de 600+5% Cu	1,30
Résine+ tissu+5% Cu	1,37
Résine+ toutes les couches+5% Cu	1,37
Résine seule+10% Cu	1,35
Résine+ mat de 100+10% Cu	1,37
Résine+ mat de 600+10% Cu	1,38
Résine+ tissu+10% Cu	1,40
Résine+ toutes les couches+10% Cu	1,47
Résine seule+15% Cu	1,41
Résine+ mat de 100+15% Cu	1,40
Résine+ mat de 600+15% Cu	1,40
Résine+ tissu+15% Cu	1,41
Résine+ toutes les couches+15% Cu	1,42

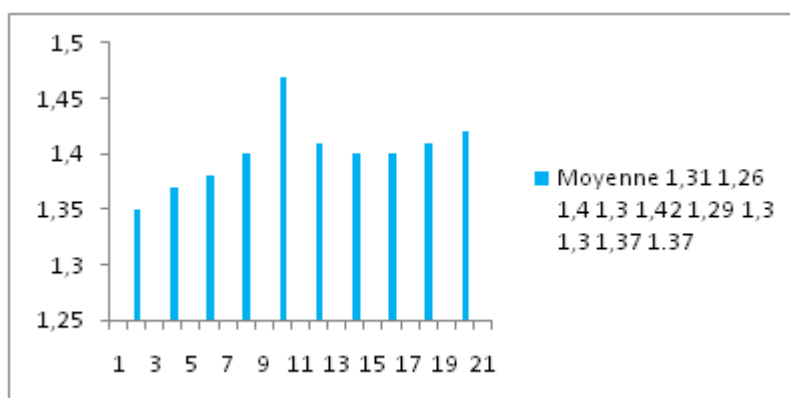


Figure IV. 11 Histogramme des densités des MC élaborés

D'après l'histogramme ci-dessus, le matériau composite le plus dense est l'échantillon 10 correspondant au matériau composite renforcé avec toutes les couches de fibres, chargé à 10% de cuivre

#### IV.4.2 Observation au microscope optique

Nous avons observé les renforts utilisés ainsi que la surface de nos différents échantillons au microscope optique.

##### IV.4.2.1 Observation au microscope optique des fibres utilisées

En comparant les figures IV a) et IV b) nous observant que la fibre de mat de 100 est moins large, mais plus dense que la fibre mat de 600, ce qui conféra à cette dernière des pouvoirs renforçants plus importants que pour la fibre mat de 100.

Sur la figure IV c) nous observons la zone de croisement de deux fibres du tissu de fibre utilisé. Les deux fibres sont perpendiculaires l'une par rapport à l'autre.

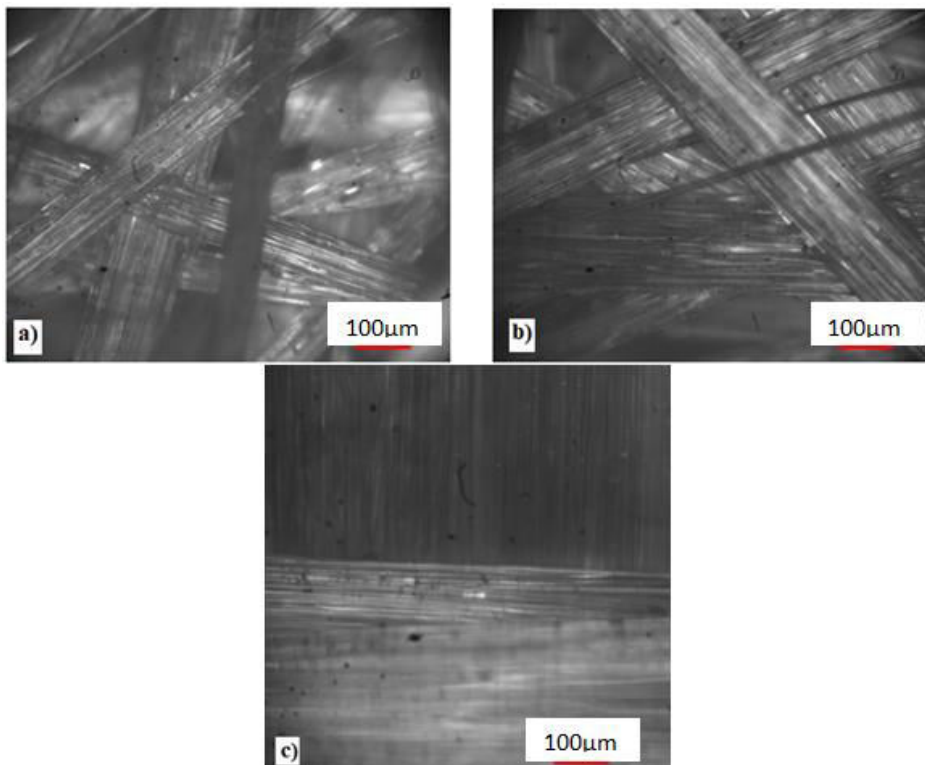
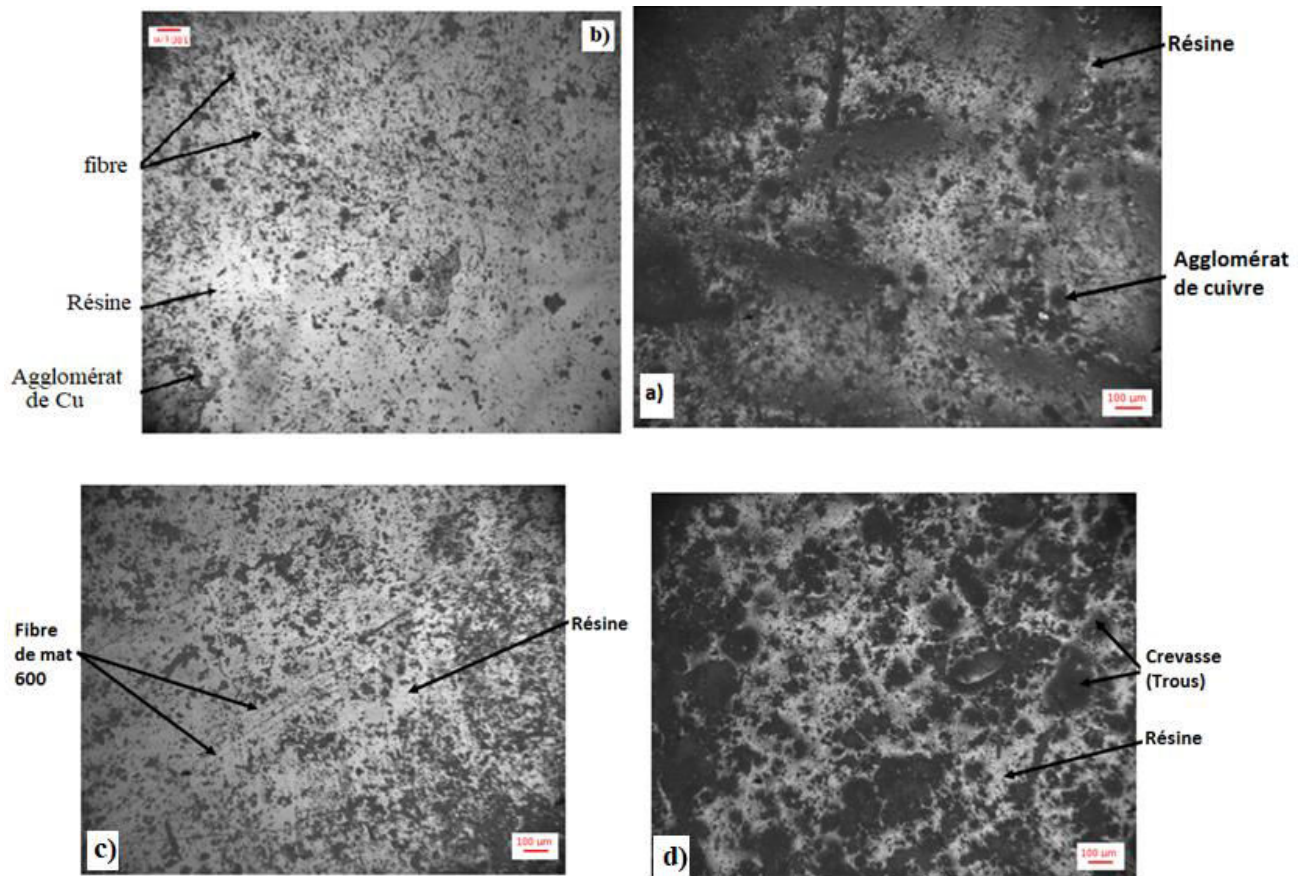


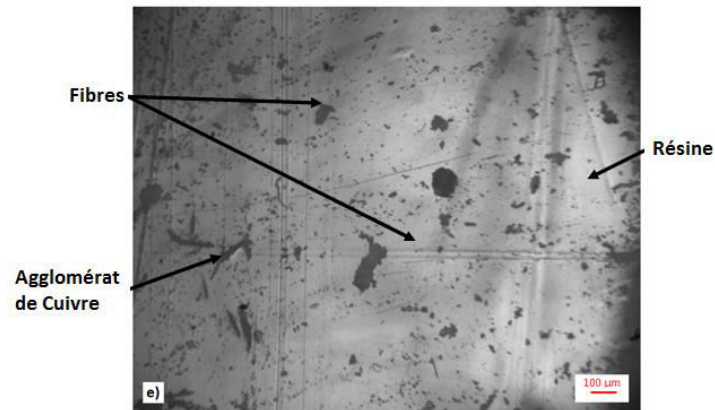
Figure IV.12 les différentes fibres du renfort

##### IV.4.2.2 Observation au microscope optique des surfaces des matériaux composites élaborés

Les observations au microscope optique de nos échantillons de matériau composite (chargés 5% en cuivre) ont révélé des états de surfaces différents, figure IV.13 ci-dessous.

- La surface de l'échantillon élaboré en résine sans renfort, chargé à 5% de cuivre (figure IV.13 a)) est formé d'une partie claire représentant la résine dans laquelle sont incrustées des zones sombres représentant le cuivre.
- Sur l'échantillon représenté par en figure IV.13 b) nous observons, en plus de la résine et du cuivre, des lignes claires de distributions aléatoires, ce sont les fibres de verre sous forme de mat 100.
- Sur la figure IV.13 c), nous observons des lignes droites de direction aléatoires se sont les fibres de mat 600, la résine parait en claire incrustée de taches noire qui représente les grains de cuivre.
- Sur la figure IV.13 d), nous observons sur la surface de l'échantillon, des crevasses des trous correspondant aux coins de croisement des fibres tissées.
- La figure IV.13 e) représente la surface de l'échantillon de matériau composite comportant les trois couches de fibres, sur sa surface on observe les fibres et la résine ainsi que des taches noires de cuivre.



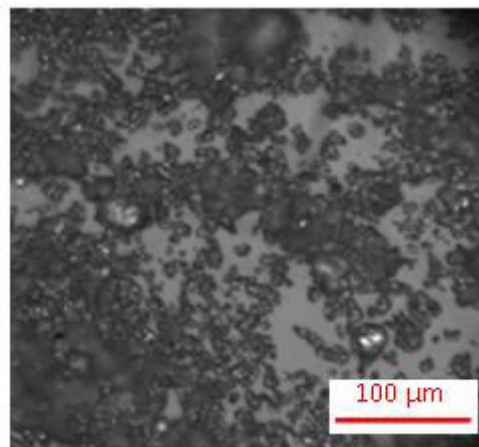


**Figure IV.13** Observation de la surface des éprouvettes élaborées (MC+5% Cu)

- a) Résine seule, b) résine + fibre mat de 100, c) résine + tissu  
 d) résine + fibre mat de 600, e) résine + toutes les couches de fibre

#### IV.4.2.3 Observation au microscope optique de la poudre de cuivre

Les grains de cuivre se regroupent sous forme d'agglomérats irréguliers (figure IV.14) se qui a influencé l'homogénéité du matériau composite comme déjà cité (calcination).



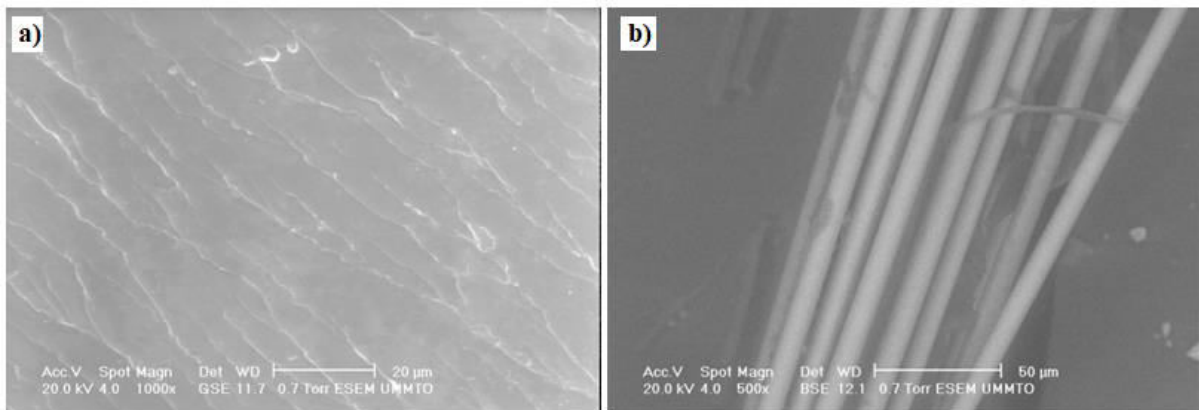
**Figure IV.14** observation au microscope optique de la poudre de cuivre.

#### IV.4.3 Observation au MEB des faciès de rupture

Nous avons analysé, au microscope électronique à balayage, les faciès de rupture de nos échantillons en essai de résilience ainsi qu'on essai de flexion. On représente dans ce qui suit certaines de ces micrographies obtenues.

##### IV.4.3.1 Observation au MEB des faciès de rupture de l'essai de résilience

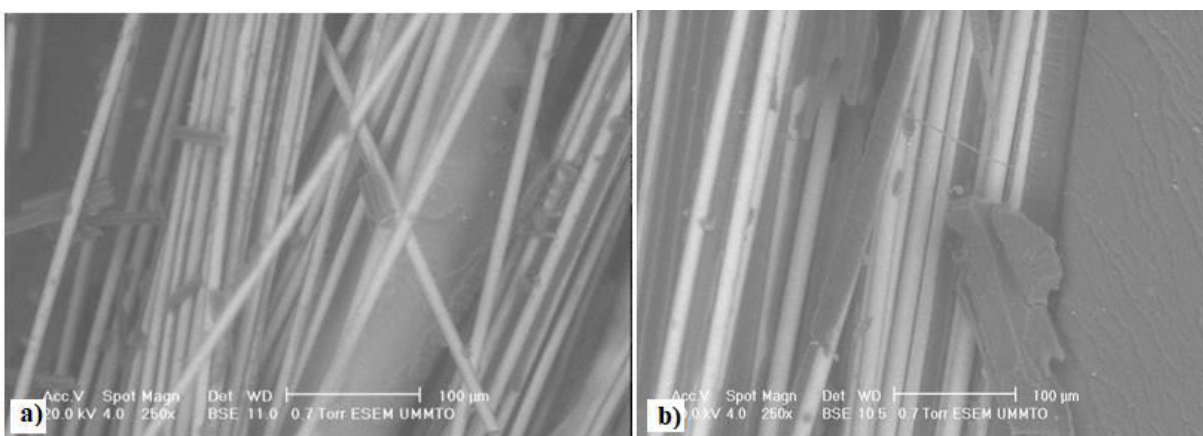
- Le faciès de rupture en résilience de la résine figure IV.15 a), donne des surfaces nettes et franches correspondant à la rupture fragile de la résine.



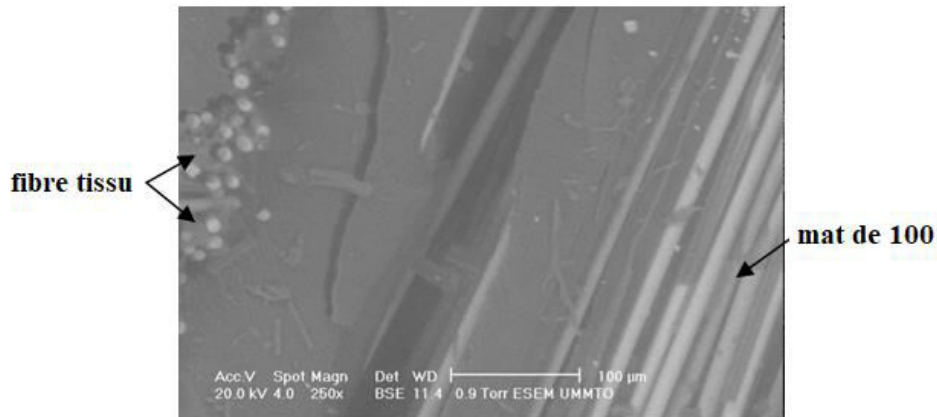
**Figure IV. 15 Observation au MEB des faciès de rupture de l'essai de résilience**

**a) Résine seule, b) résine + mat de 100**

- Sur la figure IV.15 b) on observe le faciès de rupture en résilience du matériau composite renforcé en fibre de 100, les fibres se trouvent entre deux couches de résines, les fibres sont groupées parallèles dans cette zone.
- Sur la figure IV.16 a) on voit le faciès de rupture du matériau composite renforcé en fibre mat de 600, les fibres sont plus denses elles sont désordonnées;
- Sur la figure IV.16 b) on voit les fibres tissées, elles sont denses et alignées,



**Figure IV. 16 Observation au MEB des faciès de rupture de l'essai de résilience du matériau composite : a) renforcé en mat 600 b) renforcée en fibre tissée.**



**Figure IV.17 Observation au MEB des faciès de rupture de l'essai de résilience du multicouche élaboré**

Sur la figure IV.17, observe les différentes couches de renfort du multicouche, on voit des fibres longitudinales et des couches de fibres transversales, fibres tissées. Les couches de fibres longitudinales sont formées de mat 100.

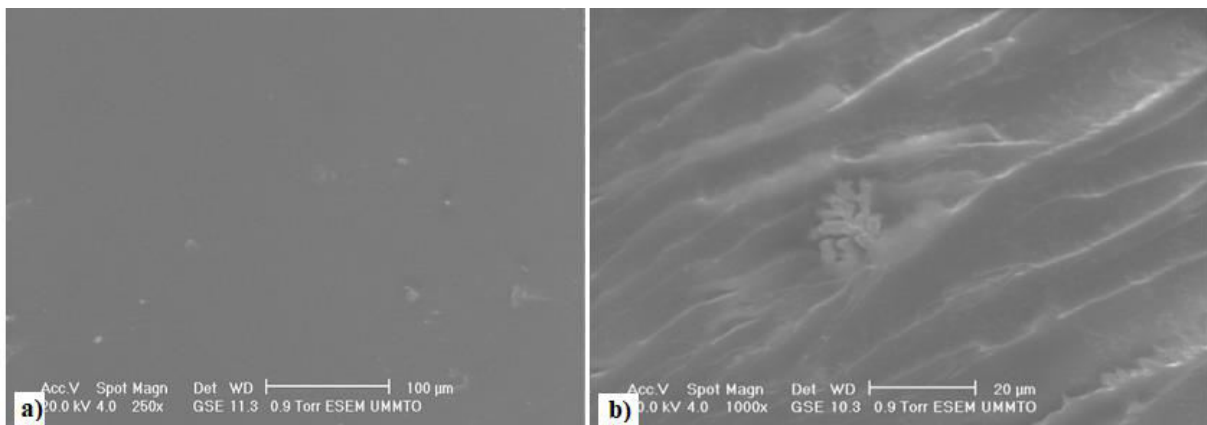
#### IV.4.3.2 Observation au MEB des faciès de rupture de l'essai de flexion

Les éprouvettes de flexion analysées au MEB, sont des éprouvettes chargées à 10% de cuivre.

Sur la figure IV.18 a), on voit le faciès de rupture en flexion de la résine vierge, sur la surface on remarque des grains correspondant aux grains de cuivre, la résine chargée en cuivre a une couleur marron foncé.

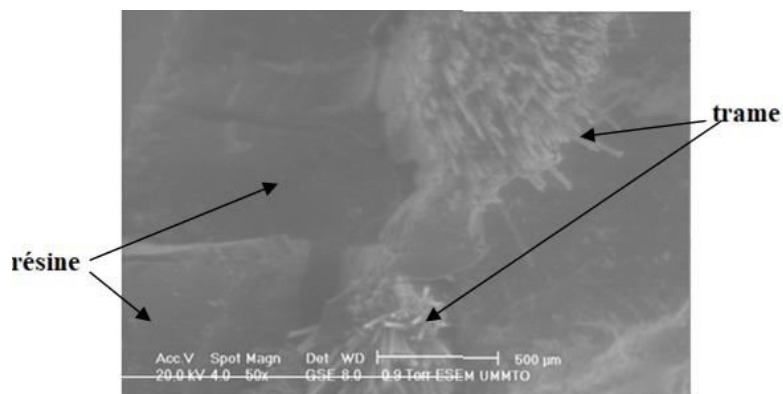
La figure IV.18 b) correspond au faciès de rupture en flexion du matériau composite chargé en mat de 100. On observe des surfaces parallèles indiquant que la résine a rompu par plan (sillons).

La figure IV.19 correspond au faciès de rupture en flexion du matériau composite chargé avec des fibres tissées. Sur le faciès on voit les trames de fibres et la résine, la résine a rompu avant la fibre, cette dernière s'est déformée et s'est allongée par rapport à la résine.



**Figure IV. 18 Observation au MEB des faciès de rupture de l'essai de flexion**

a) La résine seul b) MC renforcé en mat de 100

**Figure IV. 19 Observation au MEB des faciès de rupture de l'essai de flexion du MC renforcé avec la fibre tissée.**

# Conclusion générale

## Conclusion générale

---

Le monde de l'élaboration des matériaux composite est un monde innovant, en plein expansion, les découvertes sont toujours possibles et les combinaisons entre les propriétés des matériaux sont toujours envisageables. Nous avons mené une étude expérimentale, élaboration et caractérisation de matériaux composites renforcés en fibre de verre et chargés en poudre de cuivre.

Pour mener à bien notre étude nous avons sollicité plusieurs laboratoires d'entreprise nationales et laboratoires d'institutions universitaires.

La matière première utilisée pour l'élaboration de nos échantillons à été gracieusement donné par une entreprise privée de construction navale.

Des éprouvettes normalisées de traction, de flexion et de résilience en été élaborées.

Des tests de densité de dureté et de calcination ont été menés.

Les résultats qui découlent de notre investigation sont les suivantes :

1) En traction, on a analysé l'influence de la nature de la fibre :

- ❖ La résine polyester utilisée à un comportement fragile en traction.
- ❖ L'utilisation de la fibre mat de 100 dans le matériau composite n'améliore guère son comportement mécanique en traction, cette fibre est utilisée pour l'esthétique du matériau composite en améliorant son état de surface.
- ❖ La fibre de verre mat 600 ainsi que la fibre de verre tissée, augmente la résistance du matériau composite ; la fibre mat de 600 lui donne une résistance de 2,6 fois plus que la résistance de la résine, la fibre tissée lui donne une résistance dépassant 4 fois la résistance de la résine.
- ❖ Le multicouche élaboré par la superposition de toutes les couches de fibre de verre possède une résistance maximale en traction dépassant 8 fois celle de la résine.
- ❖ Le module d'élasticité du multicouche élaboré est presque 3 fois plus grand que celui de la résine.

2) En flexion, on a analysé l'influence de la nature de fibre ainsi que l'influence de la charge de cuivre :

L'influence de la nature de la fibre

- ❖ La fibre de verre mat de 100 n'apporte aucune amélioration de la contrainte en flexion, elle diminue la flèche du matériau composite.
- ❖ La fibre de verre mat de 600 et la fibre tissée renforce le matériau composite en flexion, c'est la fibre de 600 qui le consolide le plus.(5 fois la résistance de la résine, contre 3

## Conclusion générale

---

fois pour la fibre tissée), chaque une de ces fibre augmente considérablement la flèche du matériau composite.

- ❖ Le multicouche a une résistance en flexion de 6 fois la résistance de la résine, et une flèche plus importante aussi.

L'influence en flexion du taux de charge

- ❖ L'ajout des particules de cuivres augmente globalement la résistance en flexion mais diminue la flèche des composite élaboré (sauf pour le certain cas de la fibre 100 et fibre tissée)

3) Résultats de l'essai de résilience

L'influence de la nature de la fibre

- ❖ Le matériau composite renforcé en fibre mat de 100 est 4.5 fois plus résilient que la matrice seule.
- ❖ La résilience de la fibre de 600 est de 16 fois plus résiliente que la résine seule.
- ❖ Le multicouche élaboré est 53 fois plus résilient que la résine seule.

L'influence du taux de charge

L'influence du taux de charge sur la résilience de nos matériaux élaborés n'est pas concluente. Tantôt positive et tantôt négative.

4) Résultats des essais de dureté et micro dureté

Ce test nous a permis de déterminer la valeur de dureté des constituants de nos échantillons, on trouve :

- ❖ La dureté de la résine est entre [13,1-18,8]
- ❖ valeur de la dureté du cuivre appartient à l'intervalle [22,8-33,9]
- ❖ La valeur de la dureté de la fibre appartient à l'intervalle [6,11-10,6]

5) L'observation au microscope optique :

Nous a permis de visualiser la disposition des différentes fibres et la forme de la poudre de verre utilisée.

6) L'observation au microscope électronique à balayage (MEB) :

Nous a permis de voir les faciès de rupture de la résine (rupture fragile), la dispersion non homogène du cuivre dans le matériau composite, nous avons vu aussi les différentes couche de fibre, et leurs positions, par rapport à la résine, dans le matériau composite.

## Conclusion générale

---

### Perspectives

Nous n'avons pas pu réaliser certaines analyses pour nos échantillons, par manque de temps et de disponibilité de matériels. Nous souhaitons poursuivre notre travail en réalisant les tests de conductivité électrique et thermique, la dilatométrie, l'analyse DSC et l'analyse par infrarouge.

# ***BIBLIOGRAPHIE***

- [1] Djebbloun Youcef, Etude de la rupture en MODE I d'ouverture des matériaux composites, Université de Biskra (2004).
- [2] Pierre Jaquinet, Utilisation des matériaux composites, Edition Hermès, Paris, 1991.
- [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] Michel Dequatremare Thierry Devers, Matériaux parcours IUT, Dunod, Paris, 2012
- [11] Ibrahim Mohamed Haisam, Elaboration des matériaux composites modèles uni filamentaire à fibres longues et matrice silice sil-gel et caractérisations micromécaniques de l'interface, Thèse de doctorat Lyon 1997.
- [12] Marc Moreau, Directeur de recherche CNRS, Université Paul Sabatier de Toulouse.
- [13] J.Bortoluzzi, B.Malatraït, L Ribstein, Les microscopes électroniques, Université de Strasbourg, 2011-2012.
- [14] F.Balluffier et A.Lemason, Analyse de défaillance pièces plastiques, élastomères ou composites. Guide pratique centre technique des industries Mécanique (CETIM) 1999.
- [15] site : <http://www.utc.fr/tomas/Themes/Unités/>.
- [16] Technique de l'ingénieur, traité plastiques et composites, Essais mécaniques des plastiques AM3510