



Université Mohamed Khider de Biskra  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de Génie Mécanique

# MÉMOIRE DE MASTER

**Domaine : Sciences et Techniques**

**Filière : Génie Mécanique**

**Spécialité : Construction Mécanique**

Réf. : Entrez la référence du document

---

Présenté et soutenu par :  
**CHENNOUFI Chihabeddine**

Le : mercredi 10 juillet 2019

**Étude expérimentale des propriétés  
mécaniques d'un matériau composite  
renforcé par des verres longs avec différentes  
orientation.**

---

**Jury :**

<i>Dr. GUERIRA Belhi</i>	<b>MCA</b>	Université de Biskra	Président
<i>Dr. DRIAS Nouredine</i>	<b>MCB</b>	Université de Biskra	Rapporteur
<i>Dr. MOHAMDI Djemoui</i>	<b>MCB</b>	Université de Biskra	Examineur

# Dédicace

*Je dédie ce présent mémoire*

*A mes chers parents qui ont toujours veillé sur moi,*

*A la famille **Chennoufi**.*

*&*

*A tous mes amis*

*Et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'achèvement  
de ce modeste travail.*

➤ *Chihabeddin*

# Remerciements

*Louange à Dieu qui m'a aidé à terminer ce travail et m'a donné le courage et la patience.*

*Je tiens à exprimer mes vifs remerciements à mon encadreur, et mon grand frère Dr. DRIAS Nouredine Pour le soutien et pour tout le bagage scientifique qui m'a transmis durant ce Projet.*

*Je tiens aussi à remercier Pr. TATI Abdelouaheb, ainsi que les enseignants du département de G.M., en particulier Mrs SEDIRA Lakhdar, DJOUDI Tarek et DJEBLOUN Youcef pour m'avoir aidé à réaliser ce travail.*

*Mes vifs et sincères remerciements aussi aux membres de jury : Dr.Guerira Belhi et Dr.Mhamdi Djemouai de l'université de Biskra.*

*Je remercie également le personnel de l'usine MAGHREB PIPE Industries M'sila. Ainsi que les ingénieurs et les techniciens du hall technologique et tous ceux qui nous ont aidés pour réaliser cette étude de master.*

*Mes remerciements les plus chaleureux vont à tous ceux qui ont contribué et participé de près ou de loin à la réalisation et réussite de ce modeste travail.*

## SOMMAIRE

### Remerciements

### Sommaire

### Liste des figures

### Liste des tableaux

### Liste des notations et symboles

## Chapitre I : Généralités sur les matériaux composites

I.1. Généralités sur les matériaux composites.....	3
I.2. Définition.....	3
I.3. Constituants des matériaux composites.....	3
I.3.1. Les renforts.....	4
I.3.1.1. Différentes natures de renfort.....	5
I.3.1.2. Principales caractéristiques mécaniques des fibres de base.....	5
I.3.2. La matrice.....	6
I.3.2.1. Différentes natures de la matrice.....	6
I.3.2.2. Principales caractéristiques mécaniques des résines.....	7
I.3.3. Charges.....	7
I.3.4. Les additifs.....	8
I.3.5. Interface.....	8
I.4. Mise en œuvre des matériaux composites.....	8
I.4.1 Les types de moulage.....	9
I.4.2. Moulage au contact.....	9
I.4.2. Moulage par projection simultanée.....	10.
I.5. Architecture des matériaux composites.....	10
I.5.1. Monocouche.....	10
I.5.2. Stratifiés.....	11
I.5.3. Sandwichs.....	11

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

II.1.Introduction.....	13
II.2. Comportement élastique des matériaux.....	13
II.2.1. Loi de Hooke généralisée.....	14
II.2.1.1. Matrice de rigidité.....	14
II.2.1.2. Matrice de souplesse.....	15
II.2.2. Déficients matériaux.....	15
II.2.2.1. Matériaux monocliniques.....	15
II.2.2.2. Matériaux orthotropes.....	16
II.2.2.3. Matériaux isotropes.....	17
II.2.2.4. Matériaux isotropes transverses.....	18
II.2.2.5. Matériaux quasi isotropes transverses.....	19
II.2.2.6. Matériaux quasi isotropes.....	19
II.3. Caractéristiques mécaniques du mélange renfort-matrice.....	21

## **Chapitre III : Etude expérimentale des plaques**

III.1. Introduction.....	23
III.2. Préparation et fabrication.....	23
III.2.2. Matériaux.....	24
III.2.3. Matériels.....	24
III.2.4. Les étapes de base de la stratification.....	24
III.2.5 Taux de fibres.....	26
III.3. Préparation des éprouvettes.....	27
III.3.1. Eprouvette en forme d'haltère de traction.....	27
III.3.2. Eprouvette prismatiques de flexion 3 points.....	27
III.4. Défauts de fabrication.....	29
III.5. Détermination du taux de fibres.....	30
III.5.1. Opération de calcination.....	29

III.5.2.Appareillages utilisés.....	29
III.5.3.Calcination .....	30
III.5.4.Résultats de mesure du taux de verre .....	30
III.5.5. Résultats de mesure du taux de verre.....	31
III.6.2. Méthode expérimentale .....	35
III.6.2.1. Essai de vidéo traction et mesure de la déformation.....	35
III.6.2.2. déformation.....	36
III.6.2.3.Equipement utilisé pour l'essai de traction.....	36
III.6.2.4.Essais de flexion trois points.....	37

### **Chapitre V : Résultats et discussions**

IV.1. Présentation et discussions des résultats.....	41
IV.1.1. Courbes (de flexion 3 points).....	41
IV.1.2.Discussions des courbes.....	42
IV.2.1.Courbes de traction. ....	44
IV.2.2.Discussions les courbes.....	46
Conclusion générale.....	49

# *Liste des figures*

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

Fig.I.1. Constituants d'un composite.....	3
Fig.I.2. Différents types des fibres de verre .....	4
Fig.I.3. Différentes familles du renfort.....	5
Fig.I.4. Différentes familles de matrice .....	6
Fig.I.5. Différentes familles de moulage.....	9
Fig.1.6.Principe du moulage au contact .....	10
Fig.I.7.Moulage par projection simultanée .....	10
Fig.I.8.Couche de composite.....	11
Fig.I.9. Constitution d'un stratifié .....	11
Fig.I.10.Matériaux sandwiches à âmes pleines .....	12

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

Fig.II.1. Représentation des trois plans de symétrie d'un matériau orthotrope.....	16
Fig.II.2. Structure élémentaire d'un matériau composite unidirectionnel.....	21

## **Chapitre III : Etude expérimentale des plaques**

Fig. III.1. Balance.....	25
Fig.III.2. Résine.....	25
Fig.III.3.Moule .....	25
Fig.III.4.Durcisseur .....	25
Fig. III.5. Révélateur (Agent de démoulage).....	25
Fig.III.6.Fibre de verre .....	25
Fig. III.7.Ebulleur.....	25
Fig. III.8.Plaque.....	25
Fig.III.9.schema d'empilement des couches d'un stratifié.....	25
Fig.III.10. Machine de coupe .....	27
Fig. III.11.Géométrie des éprouvettes de traction .....	27
Fig.III.12. des éprouvettes de traction $[45_2,-45_2]_{as}$ et $[45_2,-45_2]_s$ .....	27
Fig.III.13. Eprouvette d'essai .....	28

Fig.III.14.Dimension des éprouvettes stratifiées $[45_2,-45_2]_{as}$ et $[45_2,-45_2]_s$ .	28
Fig.III.15.bulles d'air. Image microscopique ( $\times 60$ )	29
Fig.III.16.Différence des épaisseurs Image macroscopique ( $\times 60$ )	29
Fig.III.17.Pesage des échantillons	30
Fig.III.18.four	30
Fig.III.19.disposition des fibres	30
Fig. III.20.Les tâches disposées sur l'échantillon	36
Fig. III.21.Interprétation schématique de la méthode de Gsell	36
Fig.III.22.Dispositif d'enregistrement des données de l'essai	37
Fig. III.23.Essai de traction	37
Fig. III.24.Essai de flexion 3 points.	38
Fig. III.25.Plaque quasi isotrope soumise à un chargement de flexion	39

### **Chapitre V : Résultats et discussions**

Fig.IV.1.Courbe charge – déplacement en flexion 3 points du stratifié $[45_2,-45_2]_s$ symétrique	41
Fig.IV.2.Courbe charge – déplacement en flexion 3 points du stratifié $[45_2,-45_2]_{as}$ asymétrique.	41
Fig.IV.3.Courbe charge – déplacement en flexion 3 points du stratifié $[45_2,-45_2]_{as}$ asymétrique	42
Fig.IV.4.Courbe charge – déplacement en flexion 3 points du stratifié $[45_2,-45_2]_s$ symétrique	42
Fig.IV.5.Courbe de Contrainte - Déformation en traction du stratifié $[45_2,-45_2]_{as}$ asymétrique	45
Fig.IV.6.Courbe de Contrainte - Déformation en traction du stratifié $[45_2,-45_2]_s$ symétrique	45
Fig.IV.7.Courbe Contrainte - Déformation en traction unidirectionnelles longitudinales	46
Fig.IV.8.Courbe de Contrainte - Déformation en traction unidirectionnelle transversale	46



# *Liste des Tableaux*

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

Tableau.I.1.Propriétés mécaniques des fibres.....	5
Tableau.I.2.Principales propriétés des matrices Thermodurcissables et Thermoplastiques...	7
Tableau.I.3.Propriétés mécaniques des résines.....	7
Chapitre III : Etude expérimentale des plaques	
Tableau.III.1.Caractéristique mécaniques de la résine polyester(isophthalique).....	23
Tableau.III.2.Caractéristiques des fibres.....	23
Tableau.III.3.Le taux de renforcement dans les plaques moulées.....	26
Tableau.III.4. Résultats de calcination des éprouvettes testées en flexion 3 points .....	31
Tableau.III.5. Résultats de calcination des éprouvettes testées en flexion 3 points .....	31
Tableau.III.6.Résultats de calcination des éprouvettes testées en flexion 3 points .....	31
Tableau.III.7.Résultats de calcination des éprouvettes testées en flexion 3 points .....	32
Tableau.III.8.Résultats de calcination des éprouvettes testées en traction .....	32
Tableau.III.9.Résultats de calcination des éprouvettes testées en traction avec les caractéristiques suivantes .....	32
Tableau.III.10.Résultats de calcination des éprouvettes testées en traction avec les caractéristiques suivantes .....	33
Tableau.III.11.Résultats de calcination des éprouvettes testées en traction avec les caractéristiques suivantes.....	33
Chapitre V : Résultats et discussions	
Tableau IV.1 : Résultats de flexion 3 points - taux de fibres $M_f = (35.78)\%$ .....	43
Tableau IV.2 : Résultats de flexion 3 points - taux de fibres $M_f = (33.11)\%$ .....	43
Tableau IV.3 : Résultats de flexion 3 points - taux de fibres $M_f = (34.56)\%$ .....	43
Tableau IV.4 : Résultats de flexion 3 points - taux de fibres $M_f = (34.92)\%$ .....	44
Tableau.IV5 : Résultats de traction - taux de fibres $M_f = (31.71 \pm 0.89)\%$ .....	47
Tableau.IV6 : Résultats de traction - taux de fibres $M_f = (30.86 \pm 1.83)\%$ .....	47
Tableau.IV7 : Résultats de traction - taux de fibres $M_f = (29.35 \pm 0.24)\%$ .....	47
Tableau.IV8 : Résultats de traction - taux de fibres $M_f = (30.63 \pm 1.63)\%$ .....	47

## Liste des notations et symboles

<b>Symbole</b>	<b>Désignation</b>	<b>Unité</b>
$\rho$	Masse volumique du matériau composite	[g/mm <sup>3</sup> ]
$M_f, M_m$	Fraction massique des fibres et de la matrice en	[%]
$V_f, V_m$	Teneur en volume du renfort et de la matrice	[mm <sup>3</sup> ]
$\rho_f, \rho_m$	Masse volumiques du renfort et de la matrice	[g/mm <sup>3</sup> ]
$E$	Module d'élasticité	[MPa]
$G$	Module de cisaillement	[MPa]
$E_f, E_m$	Modules de Young des fibres et de matrice respectivement	[MPa]
$E_t$	Module de Young dans le sens transversal des fibres	[MPa]
$E_l$	Module de Young dans le sens Longitudinal des fibres	[MPa]
$\sigma_r$	Résistante à la traction	[MPa]
$\varepsilon$	Déformation	
$\nu$	Coefficient de Poissen	
$S_t$	éprouvette prise dans le sens transversal des fibres	
$S_l$	éprouvette prise dans le sens des fibres	

Introduction

Générale

## Introduction

Les matériaux composites occupent une place de plus en plus importante dans la réalisation de structures à hautes performances mécaniques (aérospatiale, aéronautique, automobile, biomécanique,...). De telles utilisations doivent nécessairement s'accompagner d'une bonne connaissance du comportement du matériau [1].

Ceux-ci résultent de l'association de deux composantes : la matrice, qui a souvent des propriétés mécaniques faibles, et des fibres, qui apportent au composite leurs hautes caractéristiques mécaniques.

Ainsi, un matériau composite est habituellement non homogène, Ces constituants, en conservant leurs propriétés individuelles, forment un nouveau matériau généralement hétérogène et anisotrope, c.à.d. dont les propriétés diffèrent suivant les directions, présentant des propriétés physiques et mécaniques supérieures à celles des éléments constitutifs pris individuellement. On distingue essentiellement deux types de matériaux composites : les stratifiés obtenus par empilement de couches en composite orientées différemment, cette structure permet de maximiser certaines propriétés mécaniques dans les directions voulues, et des panneaux sandwiches à usage différents. Les principaux avantages des matériaux composites peuvent être résumés en ce qui suit : légèreté, résistance, rigidité, possibilité de concevoir le matériau selon le besoin (pour les stratifiés et les sandwiches), réduction du poids ainsi que le coût de fabrication. L'inconvénient principal, surtout pour les matériaux à fibres longues, est le coût et, du point de vue mécanique, le comportement à la rupture, qui est généralement fragile.

Généralement, les composites sont utilisés sous forme de corps bidimensionnels, plaques ou coques. Concernant leur usage structurel et comportement mécanique, on peut distinguer des composites à fibres courtes, disposées aléatoirement dans une matrice isotrope (comportement mécanique macroscopique est isotrope), et composite à fibres longues, où les fibres sont disposées de façon ordonnée et orientée dans une matrice isotrope ; le comportement mécanique macroscopique est globalement anisotrope. Ces derniers, en particulier les stratifiés aux fibres de verre longues (orientées différemment) font l'objet de notre étude.

Le but de notre travail est d'élaborer des plaques en matériaux composite, à matrice organique (résine polyester), renforcée par des fibres de verre longues. Le travail renferme

quatre chapitres, dont le premier est une présentation bibliographique touchant des généralités sur les matériaux composites tels que leurs différents constituants et leurs architectures ainsi que les différents procédés de mise en œuvre et leurs domaines d'application ; le second étant consacré à la formulation décrivant le comportement mécanique des matériaux composites. Il s'agit de déterminer les termes de la matrice de rigidité en utilisant les lois de mélange. Le troisième chapitre est réservé à l'étude expérimentale : Il a été procédé, en premier lieu, à l'élaboration par le procédé de moulage au contact à température ambiante, des plaques composites en résine polyester et aux fibres de verre longues avec différentes orientations. La résine étant préparée au préalable par malaxage avec le catalyseur ; deux types de renforts, symétriques et asymétriques, ont été réalisés. Des éprouvettes de forme prismatique sont découpées des plaques afin de les soumettre aux essais de traction et de flexion en vue de l'étude de leurs caractéristiques mécaniques. Enfin une conclusion résumant le travail fait et les résultats obtenus vient achever ce travail.

# **Chapitre I**

## **Généralités sur les matériaux composites**

---

---

## I.1. Généralités sur les matériaux composites

Les matériaux composites sont de plus en plus utilisés dans divers domaines tels que l'aérospatial, ferroviaire, naval, automobile et de loisir. La nature de ces matériaux fait qu'ils ont une très grande adaptabilité à chaque domaine et il est possible de choisir pour chaque structure le meilleur compromis coût/poids/tenue mécanique. On a l'habitude de dire qu'en composite «le matériau ne préexiste pas à la structure» et chaque design nécessite donc aussi d'associer la méthode de fabrication la plus adaptée aux contraintes économiques [2].

## I.2. Définition

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

Le principal intérêt de l'utilisation des matériaux composites provient de ses excellentes caractéristiques. Ils disposent d'atouts importants par rapport aux matériaux traditionnels[3,4].

## I.3. Constituants des matériaux composites

La composition d'un matériau composite est à la base d'au moins deux composants:

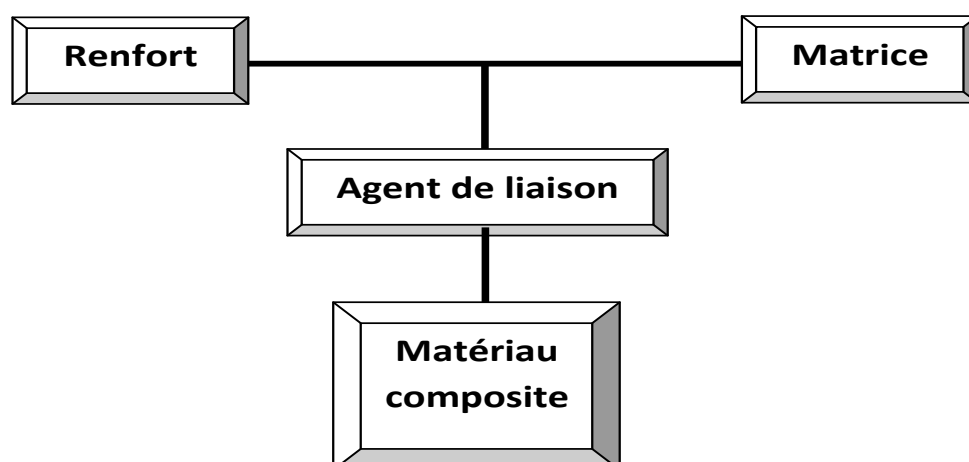


Fig.I.1. Constituant d'un composite [5]

---

le **renfort** et la **matrice**, qui doivent être **compatibles** entre eux, ce qui nécessite l'introduction d'un **agent de liaison** à l'interface [5].

### I.3.1. Les renforts

Les renforts sont tout produit qui permet d'améliorer les propriétés de la matrice (mécanique, thermique, chimique...) et assurer des meilleures propriétés mécaniques du matériau composite à élaborer. Les fibres sont disponibles sur le marché en fonction des coûts de revient recherchés pour la structure réalisée. Les renforts constitués de fibres se présentent sous les formes généralement compactes[6].



a – Roving de verre



b – Tissu de  
verre



c – Mat de  
verre

**Fig.I.2.** Différents types des fibres de verre [7]



## I.3.1.1. Différentes natures de renfort

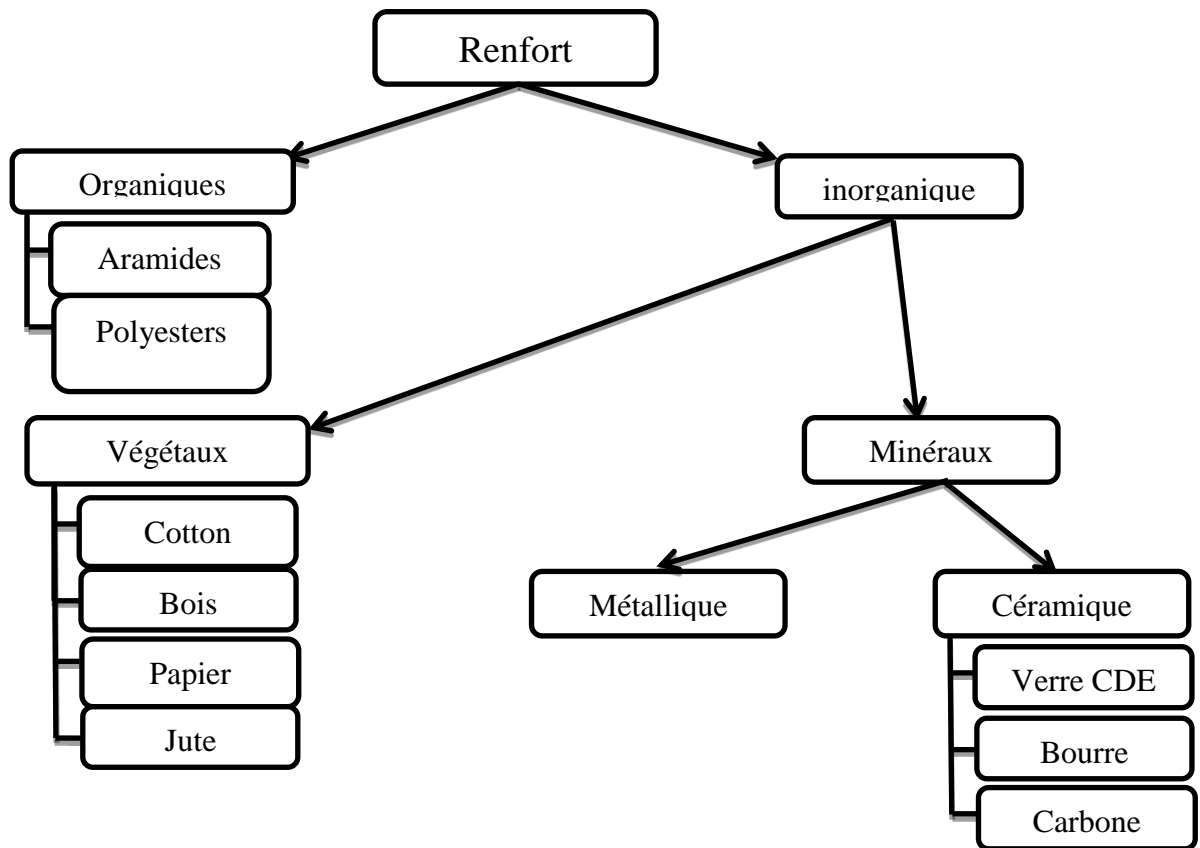


Fig.I.3. Différentes familles du renfort

## I.3.1.2. Principales caractéristiques mécaniques des fibres de base

Tableau I.1. Propriétés mécaniques des fibres[8].

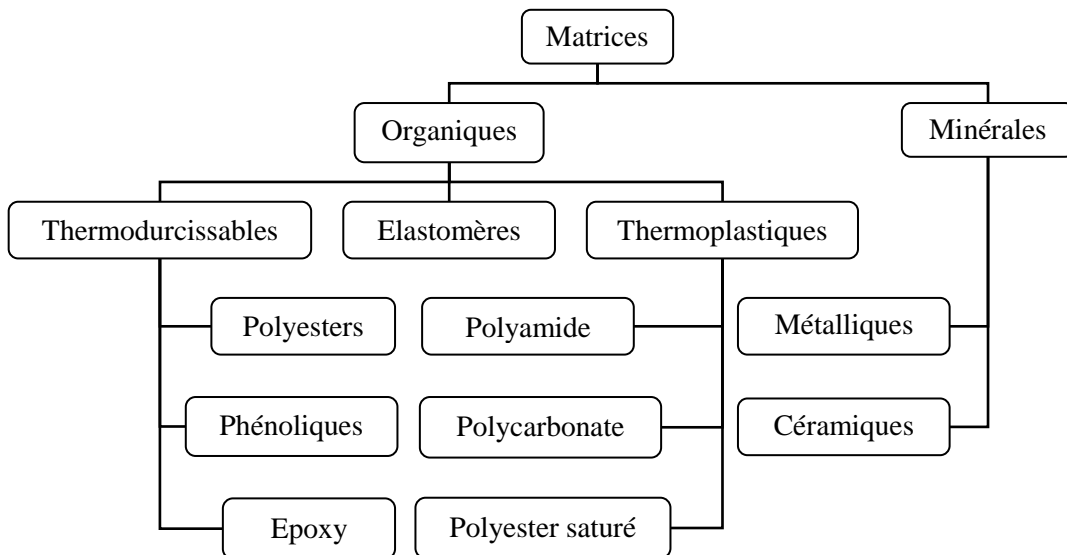
fibre	densité	$\sigma_r$ (MPa) en traction	Allongement à la rupture en %	E (MPa) Module d'élasticité	Diamètre du filament élémentaire $\mu\text{m}$
Verre E	2.54	3400	4.8	73000	3-30
Verre R	2.48	4400	5.4	86000	3-30
Aramide BM	1.45	3100	2	70000	12
Aramide HM	1.45	3100	1	130000	12

Kevlar	-	2900	2.3	130000	1.45
Aluminium	-	1380	0.7	380000	3.9
Carbone HT	1.78	2800	0.5	200000	8
Carbone HM	1.80	2200	-	400000	8
Bore	2.63	3500	0.8	400000	100-200

**I.3.2. La matrice**

La matrice est l'élément qui lie et maintient les fibres. Elle répartie les efforts (résistance à la compression ou à la flexion) et assure la protection chimique des fibres[7].

**I.3.2.1. Différentes natures de la matrice**



**Fig.I.4.**Déférentes familles de matrice[7]

- Résines thermodurcissables : se polymérisent selon la forme souhaitée. La transformation est irréversible.
- Résines thermoplastiques : mise en forme par chauffage, durcissent au cours du refroidissement. La transformation est réversible[7].

**Tableau.I.2.**Principales propriétés des matrices Thermodurcissables et Thermoplastiques[7].

Matrices	Thermodurcissables	Thermoplastiques
Etat de base	Liquide visqueux à polymériser	Solide prêt à l'emploi
Stockage	Réduit	Illimité
Mouillabilité des renforts	Aisée	Difficile
Moulage	Chauffage continu	Chauffage + refroidissement
Cycle	Long (polymérisation)	Court
Tenue au choc	Limitée	Assez bonne
Tenue thermique	Meilleure	Réduite (sauf nouveau TP)
Chutes et déchets	Perdus ou utilisés en charges	Recyclables
Conditions de travail	Emanations de solvants	Propreté

### I.3.2.2. Principales caractéristiques mécaniques des résines.

**Tableau.I.3.**Propriétés mécaniques des résines[4, 8].

	Polyester	Epoxyde	Phénolique	Polyamide	Aluminium
$\epsilon_r$ en traction (%)	2 - 5	2 - 5	2.5	-	-
$\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )	1200	1100-1500	1200	1130	2630
$\sigma_r$ en traction (MPa)	50 - 80	60 - 80	40	70	358
E en traction (GPa)	2.8 – 3.5	3 – 5	-	3	69

### I.3.3. Charges.

L'objet de la charge renforçant est d'améliorer les caractéristiques mécaniques de la résine, ou diminuer le coût des résines en conservant les performances des résines. En générale ces charges sont des microbilles ou des particules (poudre) [3].

Les principales charges utilisées sont :

- microbille en (verre, carbone, époxyde, phénolique, polystyrène, etc. ...)
- des poudres ou paillettes métalliques : (cuivre, fer, aluminium, etc. ...)

- des particules de carbone (noir de carbone)

**I.3.4. Les additifs.**

Ils sont nécessaires pour assurer une adhérence suffisante entre le renfort fibreux et la matrice, et de modifier l'aspect ou les caractéristiques de la matière à laquelle ils sont ajoutés [3].

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

- lubrifiants et agents de démoulage.
- Pigment set colorants.
- Agents anti-retraits.
- Agents anti-ultraviolets.
- Accelerator.
- Catalyseur.

**I.3.5. Interface**

En plus de ces fibres et de la matrice, il faut rajouter : une interface qui assure la compatibilité renfort/matrice, qui transmet les contraintes de l'un à l'autre sans déplacement relatif. Bonne adhérence en couche fine.

Des produits chimiques entrent aussi dans la composition du composite, l'interphase etc. ... qui peuvent jouer sur le comportement mécanique, mais n'interviennent pratiquement jamais dans le calcul de structure composite[3].

**I.4. Mise en œuvre des matériaux composites.**

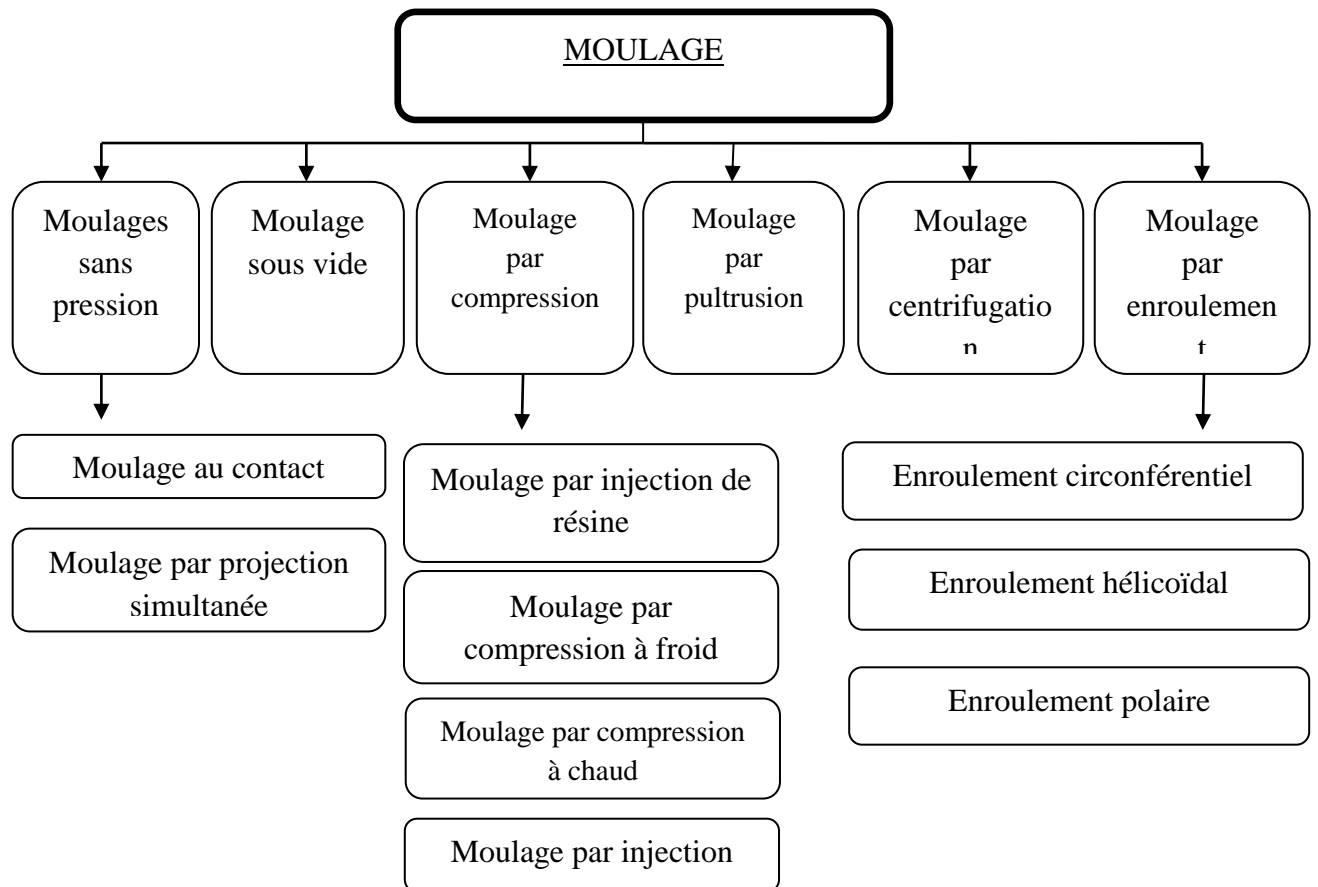
Le but de cette partie est de connaître les principes des différents processus de mise en œuvre des matériaux composites. La plupart des techniques de mise en œuvre consistent à élaborer des pièces en matériaux composites par couches successives comportant matrice et renfort. Cette technique générale appelée la stratification, conduit à l'élaboration de stratifiés, cela nous amènera ensuite à nous intéresser à l'architecture des matériaux composites [1].

Il existe de nombreuses méthodes et variantes de fabrication des matériaux composites :

---



---

**1.4.1 Les types de moulage[10].**


**Fig.I.5.** Différentes familles de moulage [10].

**I.4.2. Moulage au contact**

C'est un procédé manuel (figure 1.5) pour la réalisation des pièces à partir de résines thermodurcissables, à température ambiante et sans pression. Les renforts sont déposés sur le moule et imprégnés de résine liquide, accélérées et catalysées. Après durcissement de la résine, la pièce est démoulée. Ce procédé est utilisé pour les petites séries, de 1 à 1000. pièces/année et pour la construction de pièces de grandes dimensions ainsi que pour les revêtements sur des supports divers[10].

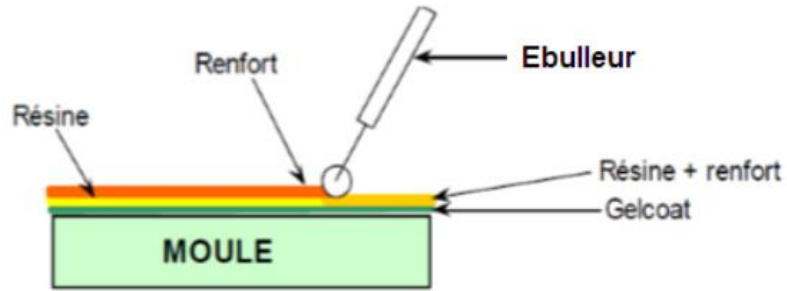


Fig.I.6 Moulage au contact [3].

#### I.4.2. Moulage par projection simultanée.

Le moulage est effectué par projection simultanée de fibres coupées et résine catalysée sur un moule (figure 1.7). 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 débarrassée des bulles au rouleau cannelé[1].

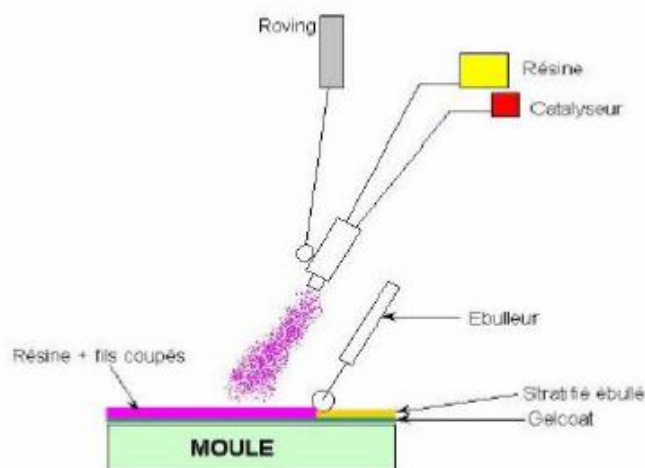
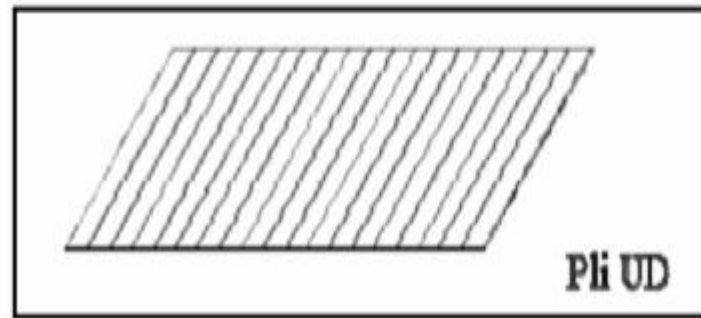


Fig.I.7. Moulage par projection simultanée [1].

### I.5. Architecture des matériaux composites

#### I.5.1. Monocouches

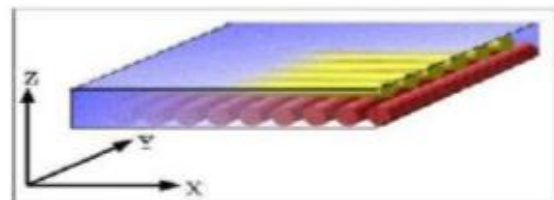
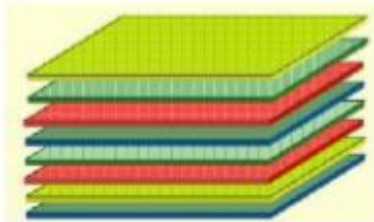
Les monocouches sont les éléments de base des structures composites. Des fibres unidirectionnelles placées dans le plan médian sont emprisonnées dans une matrice polymère. Ils sont caractérisés par le type de renfort utilisé : des fibres longues (unidirectionnelles ou non), courtes, sous forme de tissus, de rubans [10]



**Fig.I.8.**Couche de composite[11]

### I.5.2. Stratifiés.

On appelle stratifié un matériau composé d'un ensemble ordonné de couches d'orientation et d'épaisseur données, constituées de divers matériaux (figure I-9). Une couche d'un stratifié est souvent appelée une strate. Le type de stratifié est défini généralement par sa séquence d'empilement, information qui fournit de manière synthétique l'orientation des diverses couches d'un stratifié. L'avantage que présentent les composites stratifiés est de permettre de créer des matériaux aux propriétés mécaniques orientées de manière optimale afin de mieux répondre aux sollicitations de la structure[11].



**Fig.I.9.**Constitution d'un stratifié

### I.5.3. Sandwichs.

Matériaux composés de deux semelles (ou peaux) de grande rigidité et de faible épaisseur enveloppant une âme (ou cœur) de forte épaisseur et faible résistance. L'ensemble forme une structure d'une grande légèreté. Le matériau sandwich possède une grande légèreté isolant en flexion et c'est un excellent thermique [9].

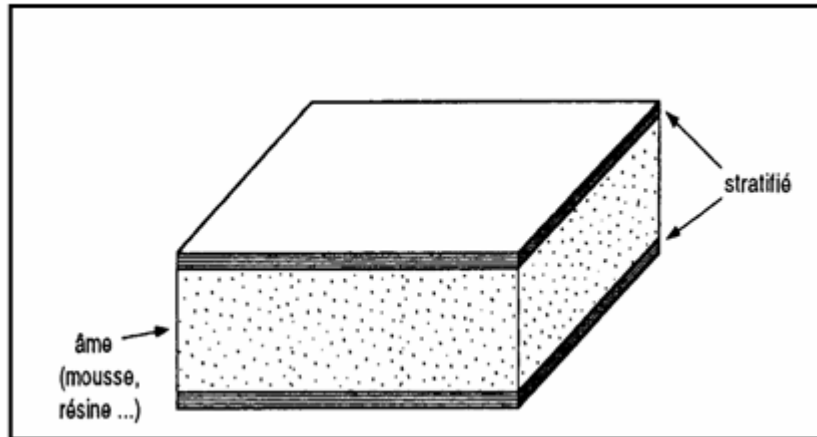


Fig.I.10. Matériaux sandwiches à âmes pleines[7]



# **Chapitre II**

## **Comportement mécanique des matériaux composite**

## II.1. Comportement élastique des matériaux

Pour un matériau donné, la loi de comportement consiste à déterminer la relation entre les contraintes et les déformations quand il est soumis à des sollicitations extérieures. Dans un milieu continu élastique l'état de contraintes, en un point dans un repère orthonormé  $(x, y, z)$  donné est entièrement définis par le tenseur des contraintes noté  $\sigma_{ij}$ . Les propriétés mécaniques de l'interface entre fibres et matrice sont très importantes dans la réalisation d'une structure composite. En effet, il ne doit avoir ni glissement ni séparation entre les différentes phases de la structure pour obtenir de bonnes caractéristiques mécaniques élastiques[12].

## II.2. Loi de Hooke généralisée

La relation d'élasticité linéaire peut s'écrire sous la forme suivante[13].

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{C} \boldsymbol{\varepsilon} \quad (\text{II.1})$$

Ou sous la forme matricielle suivante :

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

### II.2.1. Matrice de rigidité

Dans cette loi, généralement appelée loi de Hooke généralisée, la matrice de rigidité  $C$  est symétrique. Le comportement linéaire d'un matériau est donc décrit dans le cas général à l'aide de 21 coefficients indépendants. La matrice de flexibilité ou de souplesse  $S_{ij}$ , peut être écrite sous la forme inverse, suivante :

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{S} \boldsymbol{\sigma} \quad (\text{II.3})$$

### II.2.1. Matrice de souplesse

La relation d'élasticité (II.1) peut être écrite sous la forme inverse,

$$\varepsilon = S\sigma \quad (\text{II.4})$$

En introduisant la matrice inverse de la matrice de rigidité. La matrice  $S$  est appelée matrice de souplesse ou de flexibilité, et s'écrit sous le cas

$$S = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} & S_{15} & S_{16} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} & S_{25} & S_{26} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} & S_{35} & S_{36} \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{44} & S_{45} & S_{46} \\ S_{51} & S_{52} & S_{53} & S_{54} & S_{55} & S_{56} \\ S_{61} & S_{62} & S_{63} & S_{64} & S_{65} & S_{66} \end{bmatrix} \quad (\text{II.5})$$

Les coefficients  $S_{ij}$  sont appelés les constantes de souplesse ou constantes de flexibilité.

$$S = C^{-1} \quad (\text{II.6})$$

Un matériau dépendant de 21 constantes indépendantes est dit un matériau anisotrope. C'est un matériau ne possédant aucune propriété de symétrie

### II.2.2. Différents matériaux

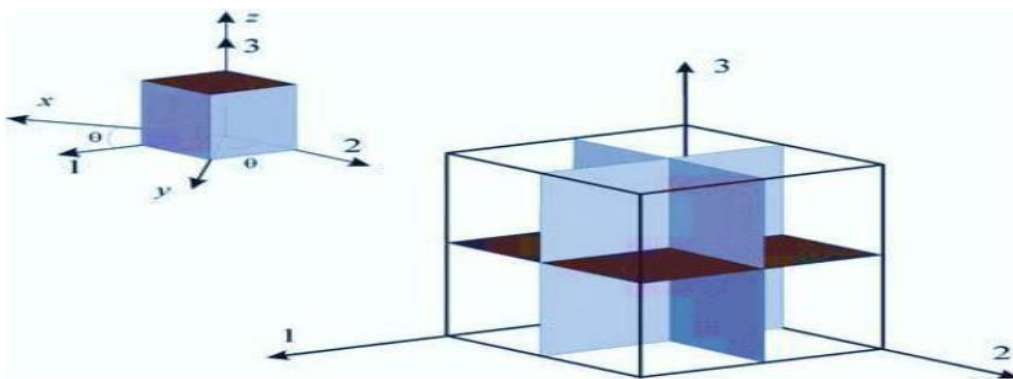
#### II.2.2.1. Matériaux monocliniques

Si le matériau a un plan de symétrie, monoclinique, quelques constantes sont nulles et le comportement peut être décrit avec 13 constantes indépendantes[12].

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & C_{16} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & C_{26} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & 0 & 0 & C_{36} \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & C_{45} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{54} & C_{55} & 0 \\ C_{61} & C_{62} & C_{63} & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{bmatrix} \quad (\text{II.7})$$

**II.2.2.2. Matériaux orthotropes**

Un milieu est dit orthotrope pour une propriété donnée si cette propriété est invariante par changement de direction obtenue par symétrie relative à deux plans orthogonaux. On remarque alors que la symétrie par rapport au troisième plan orthogonal est automatique. Ce mode de comportement est relativement bien réalisé pour les composites unidirectionnels [14].



**Fig.II.1.** Représentation des trois plans de symétrie d'un matériau orthotrope [14]

Les coefficients indépendants se réduisent à 9. La loi de comportement s'écrit alors :

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ & C_{11} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ & & C_{11} & 0 & 0 & 0 \\ & & & C_{44} & 0 & 0 \\ & sym & & & C_{44} & 0 \\ & & & & & C_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{bmatrix} \quad (II.8)$$

Ou encore :

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0 \\ & & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ & & & S_{44} & 0 & 0 \\ & sym & & & S_{55} & 0 \\ & & & & & S_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} \quad (II.9)$$

En introduisant les caractéristiques élastiques :

$E_1, E_2, E_3$  : Modules d'élasticité.

$G_{12}, G_{13}, G_{23}$  : Modules de cisaillement.

$\nu_{12}, \nu_{13}, \nu_{23}$  : Coefficients de poisson(contraction).

La relation (2.8) s'écrit :

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_{11}} & \frac{-\nu_{21}}{E_{21}} & \frac{-\nu_{31}}{E_{31}} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{12}}{E_{12}} & \frac{1}{E_{22}} & \frac{-\nu_{32}}{E_{23}} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{13}}{E_{13}} & \frac{-\nu_{23}}{E_{23}} & \frac{1}{E_{33}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{31}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} \quad (\text{II.10})$$

La symétrie de la matrice de souplesse [S] impose les relations suivantes :

$$\frac{\nu_{21}}{E_2} = \frac{\nu_{12}}{E_1} \quad (\text{II.11})$$

$$\frac{\nu_{31}}{E_3} = \frac{\nu_{13}}{E_1} \quad (\text{II.12})$$

$$\frac{\nu_{32}}{E_3} = \frac{\nu_{23}}{E_2} \quad (\text{II.13})$$

### II.2.2.3. Matériaux isotropes

Dans ce cas toutes les directions et en tout point du matériau ont les mêmes propriétés mécaniques. Le nombre de coefficients indépendants se réduit à 2 coefficients et la loi de comportement s'écrit[1].

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ & C_{11} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ & & C_{11} & 0 & 0 & 0 \\ & & & \frac{C_{11}-C_{12}}{2} & 0 & 0 \\ & sym & & & \frac{C_{11}-C_{12}}{2} & 0 \\ & & & & & \frac{C_{11}-C_{12}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{bmatrix} \quad (\text{II.14})$$

En termes de constantes techniques l'inverse de la relation (2.10) s'écrit :

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E} & \frac{-\nu}{E} & \frac{-\nu}{E} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu}{E} & \frac{1}{E} & \frac{-\nu}{E} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu}{E} & \frac{-\nu}{E} & \frac{1}{E} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} \quad (\text{II.15})$$

Avec :

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (\text{II.16})$$

#### II.2.2.4. Matériaux isotropes transverses

Un matériau isotrope transverse est un matériau orthotrope qui comporte un axe ou un plan d'isotropie. Les propriétés suivant l'axe 2 et 3 sont identiques, donc[12].

- $C_{22} = C_{33}$
- $C_{12} = C_{13}$
- $C_{55} = C_{66}$

- $C_{44} = \frac{C_{22} - C_{33}}{2}$

Le nombre de coefficients indépendants se réduit à 5.

La loi de comportement s'écrit alors :

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ & & C_{22} & 0 & 0 & 0 \\ & & & \frac{C_{22} - C_{33}}{2} & 0 & 0 \\ & sym & & & C_{66} & 0 \\ & & & & & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{bmatrix} \quad (II.17)$$

### II.2.2.5. Matériaux quasi isotropes transverses

Le nombre de coefficients indépendants se réduit à 6 coefficients, et la loi de comportement s'écrit[12].

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ & C_{11} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ & & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ & & & C_{44} & C_{45} & 0 \\ & sym & & & C_{44} & 0 \\ & & & & & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{bmatrix} \quad (II.18)$$

### II.2.2.6. Matériaux quasi isotropes

Le nombre de coefficients indépendants se réduit à 3 coefficients, la loi de comportement s'écrit[1].

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ & C_{11} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ & & C_{11} & 0 & 0 & 0 \\ & & & C_{44} & 0 & 0 \\ & sym & & & C_{44} & 0 \\ & & & & & C_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{bmatrix} \quad (II.19)$$

### II.3. Caractéristiques mécaniques du mélange renfort-matrice

Les lois de mélange permettent de déterminer les caractéristiques d'un matériau composites en fonction de ces constituants (fibre et matrice) et leur teneur volumique. Les caractéristiques mécaniques de ces constituants sont :

$V_f, V_m$ : Teneur volumique des constituants (f : fibre, m : matrice).

$E_f, E_m$ : Modules de Young.

$\rho_f, \rho_m$ : Masse volumique (f : fibre, m : matrice).

➤ **Teneur en volume et en masse du renfort et de la matrice**

$$V_f = \frac{\text{volume de renfort}}{\text{volume total}} \text{ et } V_m = \frac{\text{volume de la matrice}}{\text{volume total}} \quad (\text{II.20})$$

Avec :

$$V_m = 1 - V_f \text{ et } V_m = \frac{\frac{M_f}{\rho_f}}{\frac{M_f}{\rho_f} + \frac{M_m}{\rho_m}} \quad (\text{II.21})$$

$$M_f = \frac{\text{masse de renfort}}{\text{masse totale}} \text{ et } M_m = \frac{\text{masse de la matrice}}{\text{masse totale}} \quad (\text{II.22})$$

Avec :

$$M_f = 1 - M_m \text{ et } M_m = \frac{V_f \rho_f}{V_f \rho_f + V_m \rho_m} \quad (\text{II.23})$$



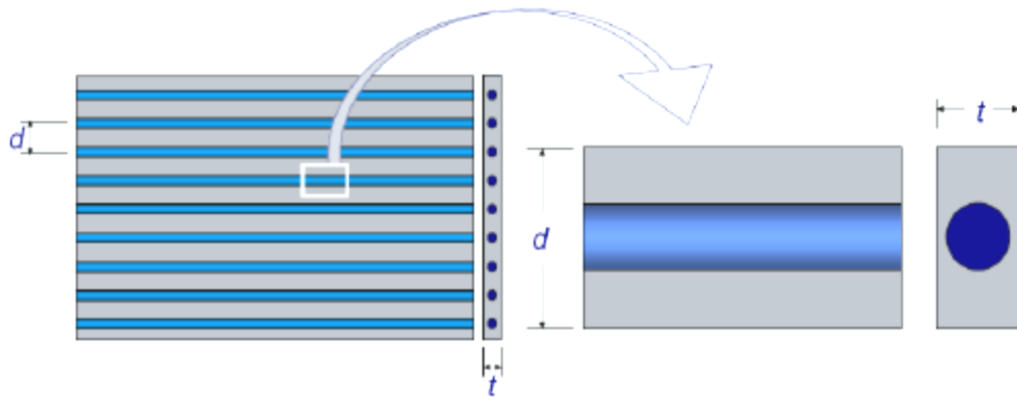


Fig.II.2. Structure élémentaire d'un matériau composite unidirectionnel

➤ **Module d'élasticité dans le sens des fibres**

$$E_l = E_m V_m + E_f V_f \quad (\text{II.24})$$

➤ **Module d'élasticité dans le sens transversal des fibres**

$$E_t = E_m \left[ \frac{1}{(1-V_m) + \frac{E_m V_f}{E_{f_t}}} \right] E_{f_t} \quad (\text{II.25})$$

$E_{f_t}$ : Module de Young dans le sens transversal des fibres (fibres anisotropes), mais dans la majorité des cas on utilise  $E_{f_t} \approx E_f$  donc :

$$E_t = \frac{E_m E_f}{E_f V_m + E_m V_f} \quad (\text{II.26})$$

➤ **Coefficient de Poisson**

Il caractérise la contraction dans le sens transverse  $t$  du pli lorsqu'on le sollicite en traction suivant le sens longitudinal.

$$v_{l_t} = v_m V_m + v_f V_f \quad (\text{II.27})$$

$$v = \frac{\varepsilon_{yy}}{\varepsilon_{xx}} \quad (\text{II.28})$$

# **Chapitre III**

## **Etude expérimentale des plaques composites**

### III.1. Introduction.

Dans notre étude expérimentale nous avons procédé à la préparation des plaques composites. A cet effet, des éprouvettes en résine polyester renforcée par les fibres de verre longues ont été élaborées, selon les normes internationales ASTM et ISO, dans le but de la caractérisation statique du matériau. Après quoi, elles ont été soumises aux essais de traction et de flexion afin de déterminer leurs propriétés mécaniques.

### III.2.Préparation et fabrication

Les plaques en matériaux composites sont fabriquées par le procédé de moulage au contact à la température ambiante. Le matériau est constitué d'une matrice de polyester renforcée par des fibres de verre long à différentes orientations. La résine est préparée préalablement par malaxage avec le catalyseur.

Le mode de renforcement des plaques comporte deux types de renfort

Symétrique [45<sub>2</sub>, -45<sub>2</sub>]s

Asymétrique [45<sub>2</sub>, -45<sub>2</sub>]as

#### III.2.1caractéristiques du matériau composite.

**Tableau III.1.**Caractéristique mécaniques de la résine polyester (iso phtalique).

Module de traction (M Pa)	Résistance à la traction (M Pa)	Résistance à la flexion (M Pa)
3100	63	90

**Tableau III.2.**Caractéristiques des fibres.

Masse surfacique (g/m <sup>2</sup> )	Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	Module d'élasticité longitudinal (GPa)	Module de cisaillement (GPa)	Coefficient de poisson	Contrainte de rupture en traction sur mèche (MPa)	Allongement à la rupture (%)
300	1200	73	30	0.22	2500	4.8

### III.2.2. Matériaux.

✓ **Fibres de verre.**

Les fibres de verre ont un excellent rapport performance-prix. Ce sont les renforts les plus utilisés actuellement dans la construction de structures composites[1].

- ✓ **Résine polyester :** La matrice constituant le matériau composite de cette étude est une matrice thermodurcissable.

### III.2.3. Matériels.

- ✓ **Durcisseur :** utilisé pour durcir la résine ;
- ✓ **Catalyseur (Révélateur) :** utilisé pour faciliter le démoulage ;
- ✓ **ciseau :** utilisé pour couper la fibre de verre longue ;
- ✓ **peinture noire et blanche :** utilisées pour tacher les éprouvettes ;
- ✓ **Moule en inox :** utilisé pour le moulage ;
- ✓ **Ebulleur :** utilisé pour dégager les bulles d'aires.

### III.2.4. Les étapes de base de la stratification

- Préparer les renforts ;
- Couper minutieusement la fibre de verre longue pour éviter sa déchirure ;
- Préparer une quantité de résine raisonnable ;
- Incorporer 2% de catalyseur N°1 ;
- Mélanger soigneusement la résine polyester et le durcisseur (liquide) ;
- Etaler la résine sur le moule ou sur la pièce à stratifier ;
- Positionner la fibre de verre ;
- Imprégner la fibre de verre, elle devient transparente une fois imprégnée
- Déposer la résine avant de mettre en place la fibre de verre
- On applique un révélateur sur une plaque rigide pour faciliter le démoulage de la plaque puis on étale une première couche de résine au moyen du rouleau. Les plis sont posés l'un après l'autre, chaque pli est soigneusement imprégné de résine à l'aide d'un rouleau et un ébulleur figure(III.7).



**Fig. III.1.** Balance



**Fig.III.2.** Résine



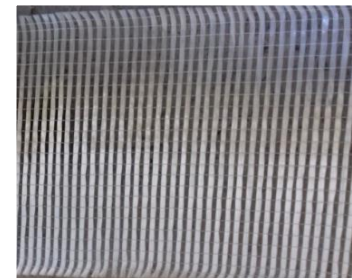
**Fig.III.3.** Moule



**Fig.III.4.** Durcisseur



**Fig. III.5.** Révélateur  
(Agent de  
démoulage)



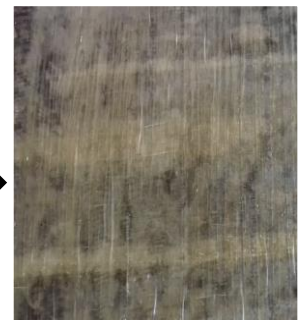
**Fig.III.6.** Fibre de  
verre



**Fig. III.7.**Ebulleur



**Fig. III.8.** Plaque



**Fig.III.9.**schema d'empilement des couches d'un stratifié

### III.2.5 Taux de fibres.

La calcination est une technique utilisée dans le but de déterminer le pourcentage de fibres de verre dans le matériau composite étudié. Nous avons coupé trois échantillons de chaque plaque. L'échantillon est pesé à l'aide d'une balance digitale de 0,001 g de précision. Ensuite l'échantillon est chauffé dans un four pendant 2 heures à une température typique de 625°C, jusqu'à ce que la résine soit totalement calcinée. Le résidu de fibres obtenues est refroidi puis pesé.

$$\text{poids de résine (g)} = \frac{\text{poids de fibre (g)} \times \text{taux de résine (\%)}}{\text{taux de fibre (\%)}}$$

Le taux de renforcement dans les plaques moulées du stratifié est donné par le tableau (III. 3).

**Tableau III.3.** Le taux de renforcement dans les plaques moulées

N°	Mode de renforcement	Poids de la résine et fibre (g)	Poids de la fibre (g)	Taux de la fibre (%)	Taux de la résine (%)
1	[45 -45 -45 45]	13.418	4.535667	33	66
2	[45 -45 45 -45]	11.067	4.473333	66	0

### III.3. Préparation des éprouvettes.

Selon les normes ASTM 5045, il est recommandé d'utiliser le disque en diamant pour découper les plaques en résine polyester renforcée de fibres tissu. On procède au découpage pour préparer les éprouvettes prismatiques pour les essais de flexion et traction.

Nous allons utiliser une machine de coupe figure(III.10).Avec les conditions de coupes suivantes :

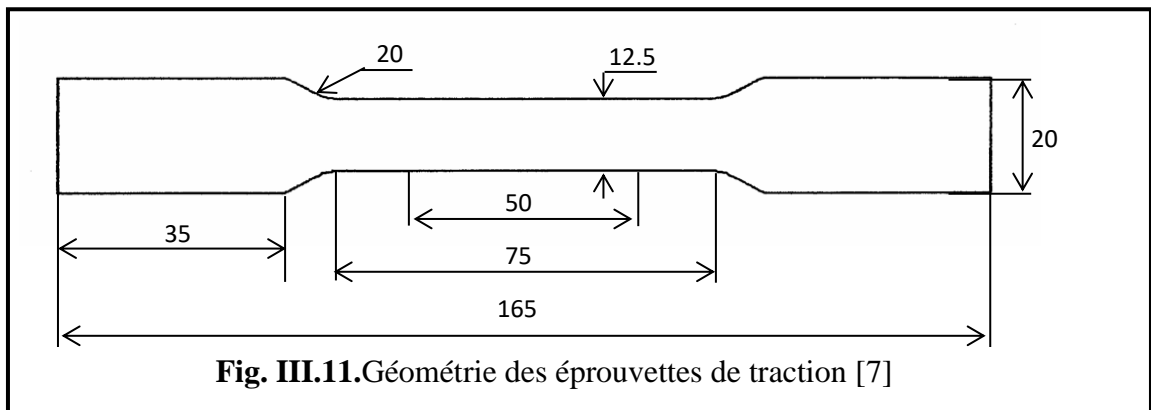
- Disque en diamant ;
- Avance manuelle lente ;
- Vitesse de coupe 3000 tr/min ;
- Sans lubrification.



**Fig.III.10.** Machine de coupe

### .III.3.1. Les éprouvette en haltère de traction

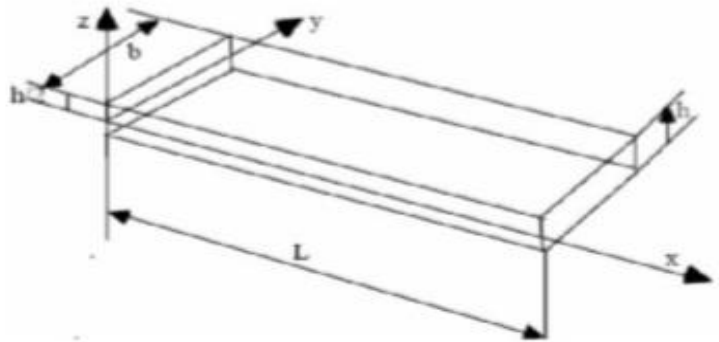
Les essais de traction ont été réalisés sur des éprouvettes en forme d'haltère, selon la norme ISO FLACHPROBE DIN 50 114 –  $12.5 \times 50$ . Figure (III.11)



**Fig.III.12.** des éprouvettes de traction  $[45_2, -45_2]_{AS}$  et  $[45_2, -45_2]_S$

### III.3.2. Les éprouvettes prismatiques de flexion 3 points

Des éprouvettes prismatiques sont découpées selon la norme NF EN ISO 178 à partir des plaques stratifiées.



L = longueur de l'éprouvette [mm]

b = largeur de l'éprouvette [mm]

h = l'épaisseur de l'éprouvette [mm]

**Fig.III.13.** Eprouvette d'essai



**Fig.III.14.** Dimension des éprouvettes stratifiées  $[45_2,-45_2]_{as}$  et  $[45_2,-45_2]_s$ .

#### III.4. Défauts de fabrication.

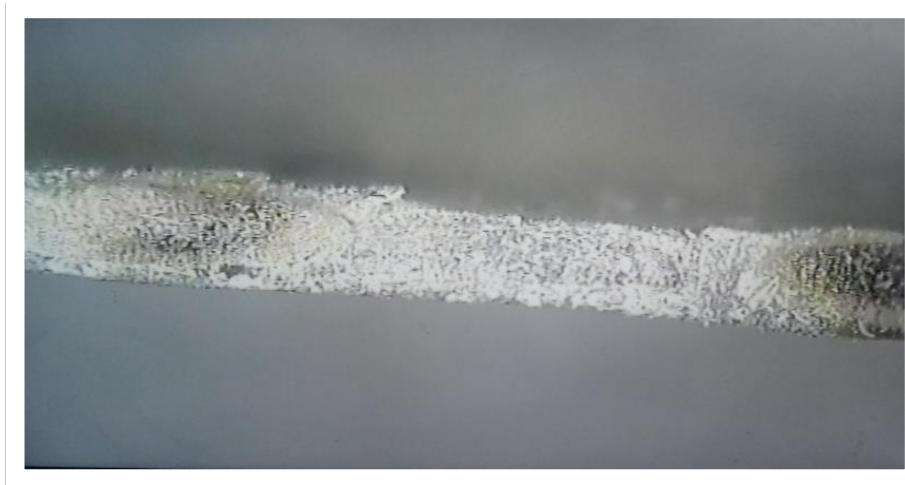
Les défauts de moulage au contact peuvent avoir plusieurs origines possibles liées :

- Le travail se fait manuellement (le taux de la résine varie sur la superficie de la pièce).
- Les bulles d'air. Figure (III.14)
- Epaisseur variable d'une pièce à une autre, d'une partie à une autre. Ce qui contribue fortement à augmenter la dispersion des résultats des essais sur les composites. Figure (III.15)





**Fig.III.15.**bulles d'air. Image microscopique ( $\times 60$ )



**Fig.III.16.**Différence des épaisseurs Image macroscopique ( $\times 60$ )

### **III.5. Détermination du taux de fibres.**

#### **III.5.1.Opération de calcination.**

Dans le but de déterminer le pourcentage en poids de fibres de verre dans les matériaux composites étudiés, moulés par contact, plusieurs échantillons de section  $(2 \times 2) \text{ cm}^2$  sont découpés des éprouvettes après les essais de caractérisation mécanique (traction et flexion). Ils ont été soumis à l'opération de calcination.

#### **III.5.2.Appareillages utilisés**

- four.
- balance électronique de précision (0.001 g).
- creuset.



**Fig.III.17.** Pesage des échantillons



**Fig.III.18.** four



**Fig.III.19.** disposition des fibres

### III.5.3. La calcination

La calcination est une méthode qui consiste en la détermination du taux de fibres dans un composite donné, on chauffe une substance à une température indiquée selon la norme dans les fours conçu à cet effet. Cette étude a pour but de déterminer le pourcentage en poids de fibres de verre dans les matériaux composites étudiés, moulés par contact. Des échantillons de section 2\*2 cm<sup>2</sup> sont soumis aux essais de caractérisation mécanique, à savoir la traction et flexion. Après quoi, ils sont placés dans un four, pendant deux heures environ, à une température de 625°C jusqu'à ce que la résine soit entièrement calcinée.

### III.5.4. Résultats de mesure du taux de verre.

Le taux de fibres de verre calculé en poids est déduit de celui de la résine. Ce dernier est donné par la formule suivante [15] :

$$M_f = \frac{B}{A} \times 100 \% \quad \text{avec } M_m = 100 - M_f \quad (\text{III.1})$$

Ou :

$$V_f = \frac{M_f \cdot \rho_m}{\rho_f - M_f \cdot (\rho_f - \rho_m)} \times 100 \% \quad \text{avec } V_m = 100 - V_f \quad (\text{III.2})$$

A : poids de l'échantillon en (g) avant calcination

B : poids de l'échantillon en (g) après calcination (poids de fibre de verre)

C : poids de la résine calciné (g)

$M_f$  et  $M_m$  : fraction massique de la fibre et de la matrice en (%)

$\rho_m, \rho_f$  : la masse volumique de la matrice et de la fibre (g/cm<sup>3</sup>)

$V_f$  et  $V_m$  : fraction volumique de la fibre et de la matrice en (%).

### III.5.5. Résultats de mesure du taux de verre

Les résultats concernant les éprouvettes, en stratifiés fabriqués par le procédé de moulage par contact, testées en traction et flexion sont consignés dans les tableaux suivants :

**Tableau III.4.** Résultats de calcination sur des éprouvettes testées en flexion 3 points avec les caractéristiques suivantes :

Nombre de couche : quatre (4)

Mode de stratification : [45 -45 -45 45]

Longueur : 100 mm

<i>Echant. A</i>	<i>A(g)</i>	<i>B(g)</i>	<i>C(g)</i>	<i>M<sub>f</sub></i>	<i>V<sub>f</sub></i>
<i>1</i>	<i>1.958</i>	<i>0.737</i>	<i>1.221</i>	<i>37.640449</i>	<i>18.644614</i>
<i>2</i>	<i>1.789</i>	<i>0.607</i>	<i>1.182</i>	<i>33.92957</i>	<i>16.806487</i>
			<i>Moyenne</i>	<i>35.78501</i>	<i>35.78501</i>
			<i>Ecart type</i>	<i>2.6239883</i>	<i>1.299752</i>
			<i>Coef _ varia %</i>	<i>7.3326466</i>	<i>3.632113</i>

**Tableau III.5.** Résultats de calcination des éprouvettes testées en flexion 3 points avec les caractéristiques suivantes :

Nombre de couche : quatre (4)

Mode de stratification : [45 -45 45 -45]

Longueur : 100 mm

<i>Echant.B</i>	<i>A(g)</i>	<i>B(g)</i>	<i>C(g)</i>	<i>M<sub>f</sub></i>	<i>V<sub>f</sub></i>
<i>1</i>	<i>2.828</i>	<i>0.888</i>	<i>1.94</i>	<i>31.400283</i>	<i>15.553644</i>
<i>2</i>	<i>2.03</i>	<i>0.707</i>	<i>1.323</i>	<i>34.827586</i>	<i>17.251306</i>
			<i>Moyenne</i>	<i>33.113935</i>	<i>16.402475</i>
			<i>Ecart type</i>	<i>2.4234694</i>	<i>1.2004281</i>
			<i>Coef _ varia %</i>	<i>7.3185788</i>	<i>7.3185788</i>

**Tableau III.6.** Résultats de calcination des éprouvettes testées en points flexion 3 avec les caractéristiques suivantes :

Nombre de couche : quatre (4)

Mode de stratification : [45 -45 45 -45]

Longueur : 200 mm

<i>Echant C</i>	<i>A(g)</i>	<i>B(g)</i>	<i>C(g)</i>	<i>M<sub>f</sub></i>	<i>V<sub>f</sub></i>
<i>1</i>	<i>2.196</i>	<i>0.728</i>	<i>1.468</i>	<i>33.151184</i>	<i>16.420926</i>

2	2.19	0.788	1.402	35.981735	17.822996
			<i>Moyenne</i>	34.56646	17.121961
			<i>Ecart type</i>	2.0015019	0.991413
			<i>Coef _ varia %</i>	5.7903007	5.7903007

**Tableau III.7.**Résultats de calcination des éprouvettes testées en flexion 3 points avec les caractéristiques suivantes :

Nombre de couche : quatre (4)

Mode de stratification : [45 -45 -45 -45]

Longueur : 200 mm

<i>Echant D</i>	<i>A(g)</i>	<i>B(g)</i>	<i>C(g)</i>	<i>M<sub>f</sub></i>	<i>V<sub>f</sub></i>
1	2.09	0.67	1.42	32.057416	15.879145
2	1.662	0.628	1.034	37.7858	18.716611
			<i>Moyenne</i>	34.921608	17.297878
			<i>Ecart type</i>	4.0505791	2.0063917
			<i>Coef _ varia %</i>	11.599062	11.599062

**Tableau.III.8.**Résultats de calcination sur des éprouvettes testées en traction avec les caractéristiques suivantes:

Nombre de couche : quatre (4)

Mode de stratification : [45 -45 -45 45]

<i>Echant A</i>	<i>A(g)</i>	<i>B(g)</i>	<i>C(g)</i>	<i>M<sub>f</sub></i>	<i>V<sub>f</sub></i>
1	1.42	0.45	0.97	31.690141	15.697221
2	1.615	0.498	1.117	30.835913	15.274093
3	1.585	0.517	1.068	32.618297	16.156968
			<i>Moyenne</i>	31.714784	15.709427
			<i>Ecart type</i>	0.8914471	0.4415645
			<i>Coef _ varia %</i>	2.8108251	2.8108251

**Tableau III.9.**Résultats de calcination sur des éprouvettes testées en traction ayant les caractéristiques suivantes :

Nombre de couche : quatre (4)

Mode de stratification : [45 -45 45 -45]

<i>B</i>	<i>A(g)</i>	<i>B(g)</i>	<i>C(g)</i>	<i>M<sub>f</sub></i>	<i>V<sub>f</sub></i>	
1	2.132	0.63	1.502	29.549719	14.636996	
2	2.23	0.671	1.559	30.089686	14.90446	
3	2.16	0.712	1.448	32.962963	16.327694	
				<i>Moyenne</i>	30.867456	15.289717
				<i>Ecart type</i>	1.8347353	0.9088078
				<i>Coef _ varia %</i>	5.9439149	5.9439149

**Tableau III.10.**Résultats de calcination des éprouvettes testées en traction avec les caractéristiques suivantes :

Nombre de couche : un (1)

Mode de stratification : [0].

<i>Nl</i>	<i>A(g)</i>	<i>B(g)</i>	<i>C(g)</i>	<i>M<sub>f</sub></i>	<i>V<sub>f</sub></i>	
1	0.747	0.218	0.529	29.1834	14.455546	
2	0.718	0.212	0.506	29.526462	14.625476	
				<i>Moyenne</i>	29.354931	14.540511
				<i>Ecart type</i>	0.2425816	0.120159
				<i>Coef _ varia %</i>	0.8263741	0.8263741

**Tableau III.11.**Résultats de calcination sur des éprouvettes testées en traction avec les caractéristiques suivantes :

Nombre de couche : un (1)

Mode de stratification : [0].

<i>Nt</i>	<i>A(g)</i>	<i>B(g)</i>	<i>C(g)</i>	<i>M<sub>f</sub></i>	<i>V<sub>f</sub></i>	
1	0.614	0.181	0.433	29.478827	14.601881	
2	0.582	0.185	0.397	31.786942	15.74517	
				<i>Moyenne</i>	30.632884	15.173525
				<i>Ecart type</i>	1.6320832	0.8084272
				<i>Coef _ varia %</i>	5.3278796	5.3278796

### III.6. Détermination du module de Young et coefficient de poisson.

#### III.6.1. Méthode analytique.

On peut déterminer le module d'élasticité à partir de la loi de Hooke par l'équation

$$E_t = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \quad (\text{III.3})$$

Avec  $E_t$  est le module d'élasticité.

$\frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon}$  Est la pente de la phase linéaire de la courbe contrainte- déformation

#### III.6.1.1. Détermination du coefficient de poisson.

Durant l'essai, l'allongement de l'éprouvette se passe dans le sens de la traction c'est-à-dire le long de la longueur  $L$ , il entraîne une augmentation de son volume si la déformation est élastique donc, il y a une compensation partielle de cette augmentation de volume par contraction latérale de l'éprouvette dans le sens de largeur  $b$ , on peut dire suivant les directions perpendiculaires à la axe de traction [12-19].

La déformation relative dans les directions  $y$  et  $z$  s'écrit :

$$\varepsilon_y = \frac{\Delta y}{y_0} ; \quad \varepsilon_z = \frac{\Delta z}{z_0} \quad (\text{III.4})$$

On définit le **coefficient de Poisson**  $\nu$  comme étant le rapport de la déformation relative transversale et longitudinale

$$\nu = \left| \frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x} \right| = \left| \frac{\varepsilon_z}{\varepsilon_x} \right| \quad (\text{III.5})$$

Les déformations transversales d'un matériau isotrope sont les mêmes dans toutes les directions. Ainsi, en tenant compte des signes de déformations, on écrit

$$\varepsilon_y = \varepsilon_z = -\nu\varepsilon_x \quad (\text{III.6})$$

### III.6.2. Méthode expérimentale

#### III.6.2.1. Essai de vidéo traction et mesure de la déformation

Les essais de traction pour les petites déformations sont effectués sur la machine de traction INSTRON TYPE 5969 équipée d'un système de mesure de déformation sans contact ce dernier est appelé vidéo traction figure(III.21).

Le principe du système se base sur l'utilisation d'une camera LVDT monté sur un PC et positionnée sur un pied, un logiciel informatique permettant les traitements en temps réel de l'image, cette méthode permet d'imposer une déformation et une vitesse de déformation axiale et de mesurer en temps réels les déformations transversales grâce à un marquage de la surface de l'éprouvette à tester figure (III.18).

Dans notre cas, c'est la méthode des quatre tâches qui a été retenue, ou deux d'entre elles sont alignées selon l'axe 1 et les autres selon la direction transversale, les déformations et les contraintes sont estimées au cours de la sollicitation dans la partie utile correspondant à un volume élémentaires représentatif de façon que la striction y soit contenue, les tâches sont disposées sur la surface [16].

L'analyse géométrique de la position de ces tâches consiste à repérer la position de leur barycentre, et d'enregistrer la variation de leurs distances relatives. Le logiciel de traitement d'image estime au cours de l'essai la déformation axiale et la déformation transverse selon l'axe 2, et enregistre au même temps la force appliquée pour déterminer la contrainte axiale, afin d'estimer les déformations axiales (direction de l'axe 1 sens de la traction) et transverse (directions 2 et 3) et par la suite la déformation volumique et la contrainte [16]

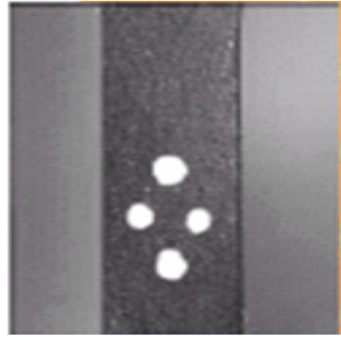


Fig. III.20. Les tâches disposées sur l'échantillon

### III.6.2.2. Déformation

L'estimation de la déformation axiale  $\varepsilon_{11}$  et transversale est réalisée à l'aide d'une interpolation polynomiale faite au niveau de la zone utile par Gsell figure (III.20) elle donne :

$$\sigma_{33} = \frac{F}{S_0 * h^2 \varepsilon_{11}} \quad \text{Et } \nu = - \frac{\varepsilon_{33}}{\varepsilon_{11}} \quad (\text{III. 7})$$

$$\varepsilon_{11} = \ln \frac{AB}{A_0 B_0} \quad \text{Et } \varepsilon_{22} = \ln \frac{CD}{C_0 D_0} \quad (\text{III. 8})$$

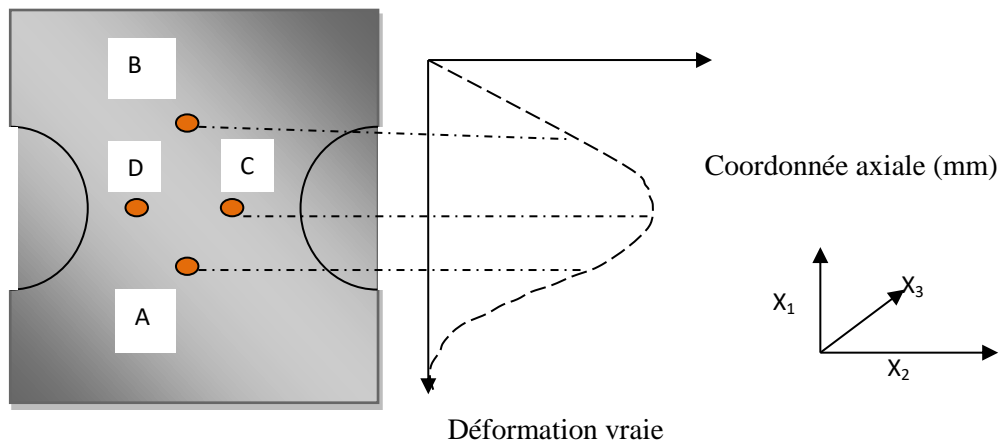


Fig. III.21. Interprétation schématique de la méthode de Gsell

Les indices 0 représentent les positions [16]

### III.6.2.3. Equipement utilisé pour l'essai de traction

La machine de traction utilisée lors de notre expérimentation est de marque INSTRON 5969 dotée d'une force de 50 KN. La déformation a été mesurée avec un extensomètre à vidéo, figure(III.23).



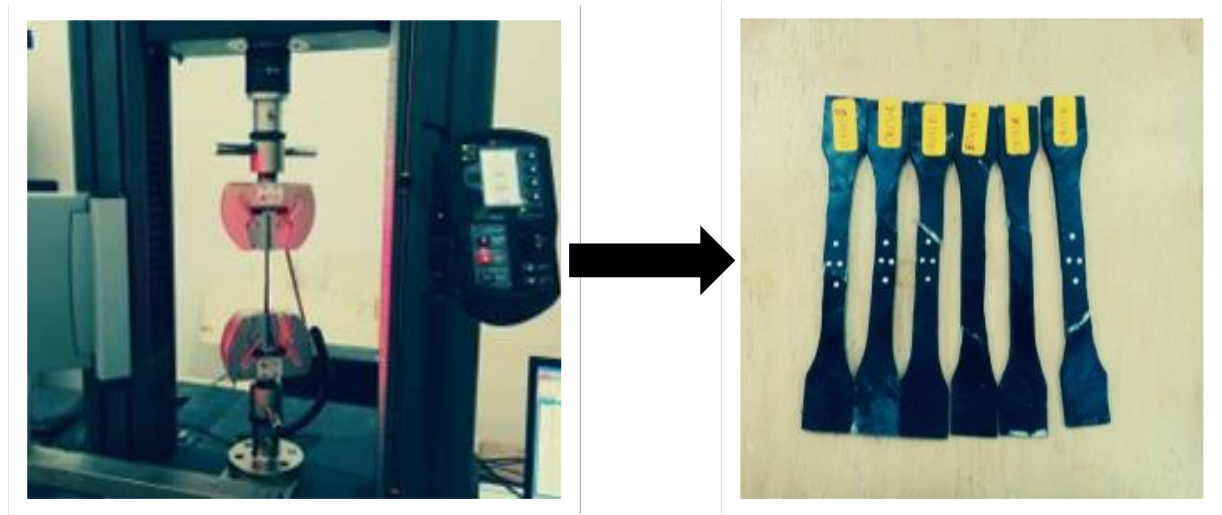


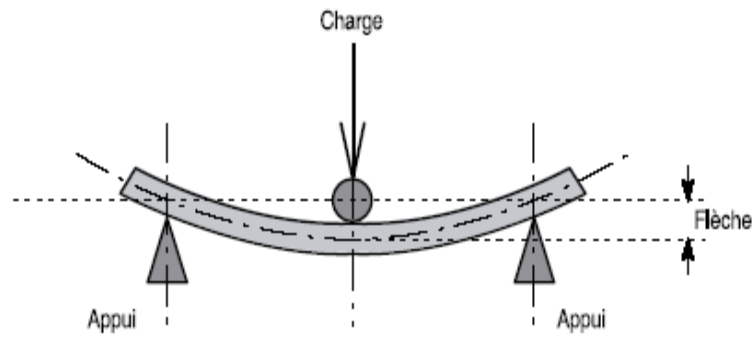
Fig. III.23. Essai de traction



Fig. III.22. Dispositif d'enregistrement des données de l'essai

#### III.6.2.4. Essais de flexion trois points

Les essais de flexion 3 points sont effectués à l'aide d'une machine universelle INSTRON constituée d'un système de flexion, un système de mesure des déplacements et un système de mesures des efforts engendrés. La machine est reliée à un ordinateur permettant le calcul direct de la charge appliquée en fonction des dimensions de l'éprouvette préalablement enregistrées avec une vitesse de traverse 2mm/min.



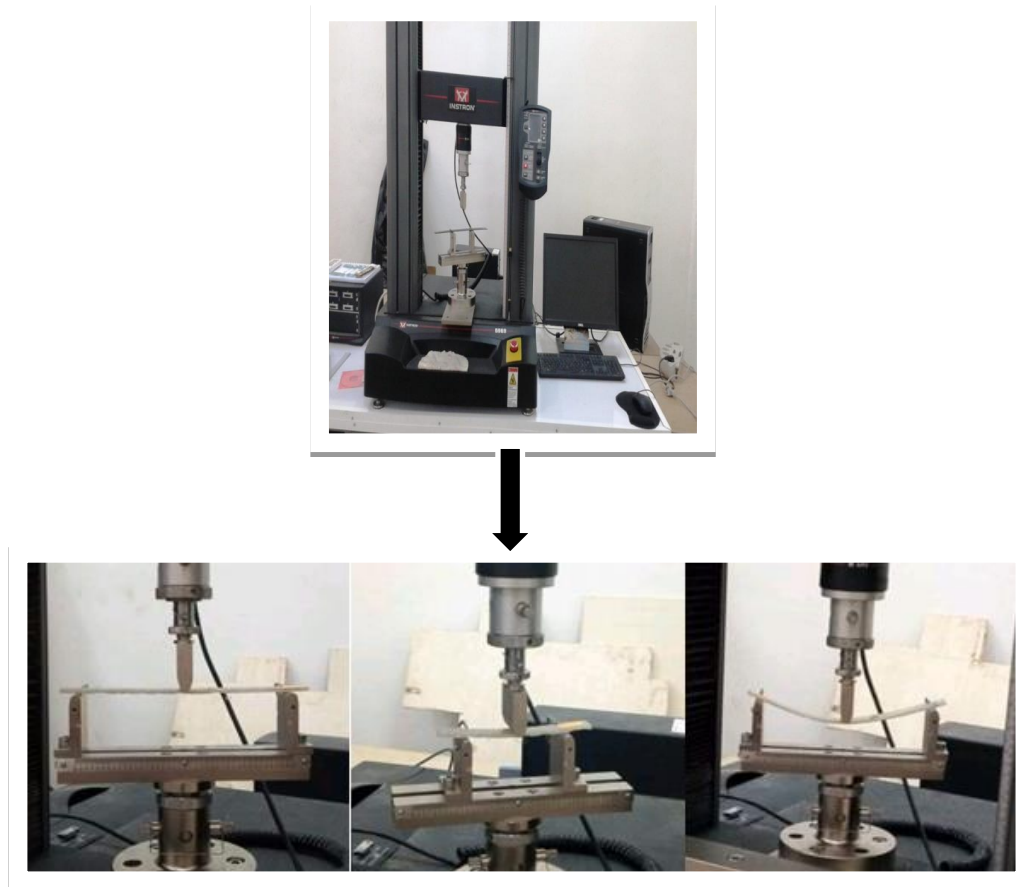
**Fig. III.25.**Plaque quasi isotrope soumise à un chargement de flexion [13]

Le module d'élasticité est déterminé par l'équation suivante, selon la norme ASTM 790-81.2005 : [44]

$$E_f = \frac{L^3}{4bh^3} \frac{\Delta F}{\Delta S} \quad \text{et} \quad \sigma = \frac{3FL}{2bh^3} \quad (\text{III. 9})$$

$\frac{\Delta F}{\Delta S}$  Est la pente de la phase linéaire de la courbe charge- déplacement

Le test de flexion 3 points est effectué sur 8 éprouvettes préparées à partir de deux plaques constituées de 04plis figure(III.24).



**Fig. III.24.**Essai de flexion3 points.

# Chapitre IV

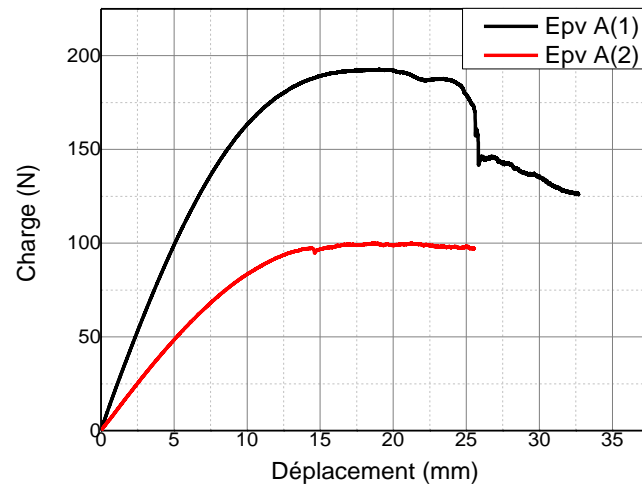
## Résultats et discussions

---

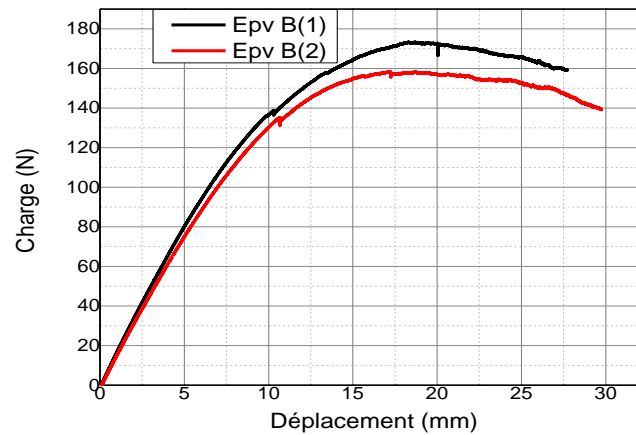
## IV.1. Présentation et discussions des résultats

### IV.1.1. Les courbes (de flexion 3 points)

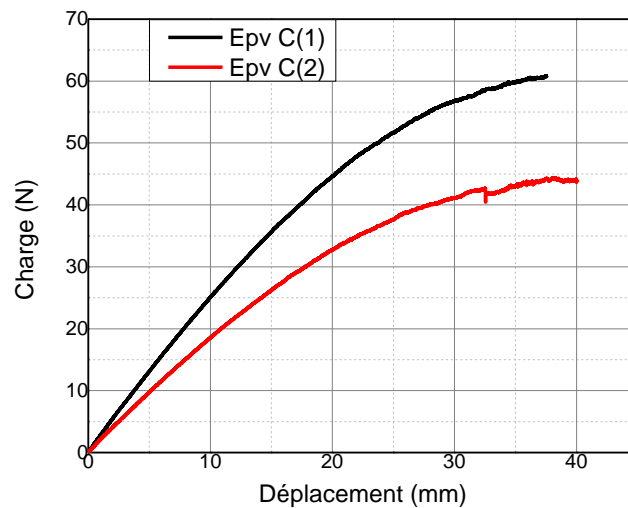
Les figures suivantes présentent les courbes de charge-déplacement dans les différents types de stratifiés (en quatre couches) symétrique et asymétrique.



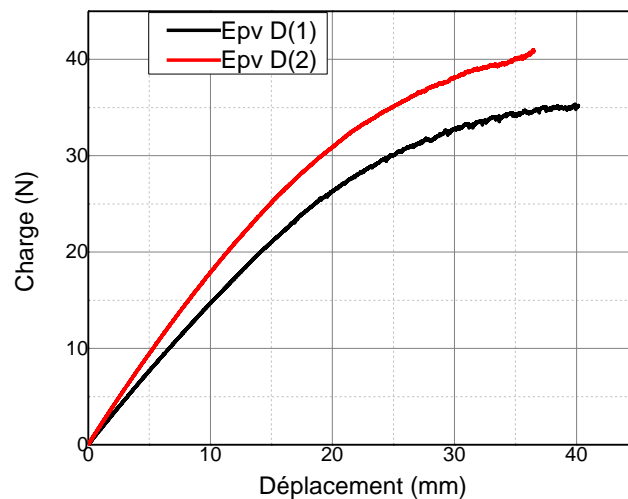
**Fig.IV.1.** Courbe charge déplacement en flexion 3 points du stratifié [45<sub>2</sub>, -45<sub>2</sub>]<sub>s</sub>



**Fig.IV.2.** Courbe charge – déplacement en flexion 3 points du stratifié [45<sub>2</sub>, -45<sub>2</sub>]<sub>as</sub>



**Fig.IV.3.** Courbe charge-déplacement en flexion 3 points du stratifié  $[45_2, -45_2]_{as}$



**Fig.IV.4.** Courbe charge-déplacement en flexion 3 points du stratifié  $[45_2, -45_2]_s$

#### IV.1.2. Discussions des courbes

Les figures IV.1 - IV.4 présentent l'évolution de la charge appliquée en fonction du déplacement, pour deux types d'éprouvettes (deux éprouvettes à quatre couches symétriques et deux autres à quatre couches asymétriques) sollicitées en flexion trois points. Leur comportement est similaire comprenant trois phases principales :

- Dans la première phase, on observe une dépendance linéaire entre la charge et le déplacement, c'est bien la partie élastique linéaire. Le module d'élasticité est déterminé dans cette zone, par l'équation(III.13).
- La deuxième phase présente une partie plastique non linéaire. A partir de cette partie, lorsque la charge maximale est atteinte, on assiste à une séparation entre la résine et les fibres, et par conséquent, au début de l'endommagement dans les composants du matériau.
- Dans la dernière phase on observe un relâchement de la contrainte, qui se termine par la rupture totale du matériau.

Les résultats de mesure du module de Young, des contraintes et déformations maximales sont consignés dans les tableaux suivants :

**Tableau IV.1** : Résultats de flexion 3 points - taux de fibres  $M_f = (35.78) \%$ .

N° (A)	Longueur L (mm)	Largeur b(mm)	Epaisseur h(mm)	$\sigma_{max}$ (MPa)	$\varepsilon_{max}$	E(Mpa)	$R^2$	
1	151.5	21	3.75	77.35	0.044	3104.9	0.9867	
2	151.5	21	3.24	62.87	0.0438	2553.9	0.999	
						Moyenne	2829.4	0.99285
						Ecart type	389.61583	0.0086974

**Tableau IV.2** : Résultats de flexion 3 points - taux de fibres  $M_f = (33.11) \%$

N° (B)	Longueur L (mm)	Largeur b(mm)	Epaisseur h(mm)	$\sigma_{max}$ (MPa)	$\varepsilon_{max}$	E(Mpa)	$R^2$	
1	151.2	21	5.45	97.77	0.0428	4881.2	0.9867	
2	151.2	21	4.24	68.062	0.0362	3548.7	0.9999	
						Moyenne	4214.95	0.9933
						Ecart type	942.21978 6	0.00933381

**Tableau IV.3** : Résultats de flexion 3 points - taux de fibres  $M_f = (34.56) \%$

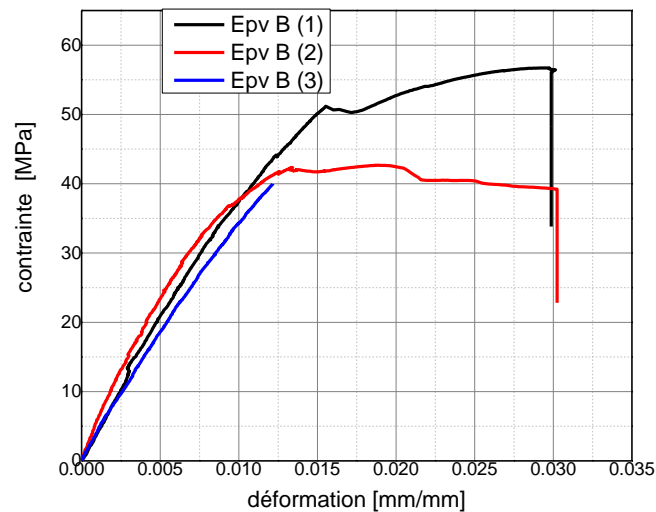
N° (C)	Longueur L (mm)	Largeur b(mm)	Epaisseur h(mm)	$\sigma_{max}$ (MPa)	$\varepsilon_{max}$	E(Mpa)	$R^2$	
1	224.5	21	4	68.061	0.0363	3534.2	0.9999	
2	224.5	21	4.36	67.65	0.0431	5278.8	0.9998	
						Moyenne	4406.5	0.99985
						Ecart type	1233.6184 9	7.0711E-05

**Tableau IV.4** : Résultats de flexion 3 points - taux de fibres  $M_f = (34.92) 0\%$ 

N° (D)	Longueur L (mm)	Largeur b(mm)	Épaisseur h(mm)	$\sigma_{max}$ (MPa)	$\varepsilon_{max}$	E(Mpa)	$R^2$
1	224.5	21	3.31	54.35	0.02249	3947.9	0.9997
2	224.5	21	3.26	67.65	0.0431	3035.9	0.9995
Moyenne						3491.9	0.9996
Ecart type						644.88138 4	0.0001414 2

#### IV.2.1. Les courbes de traction

Les figures ci-dessus présentent les courbes contrainte-déformation dans les différents types de stratifiés (quatre couches) symétrique et asymétrique et une couche unidirectionnelles

**Fig.IV.5.** Courbe de Contrainte - Déformation en traction stratifié  $[45_2,-45_2]_{as}$

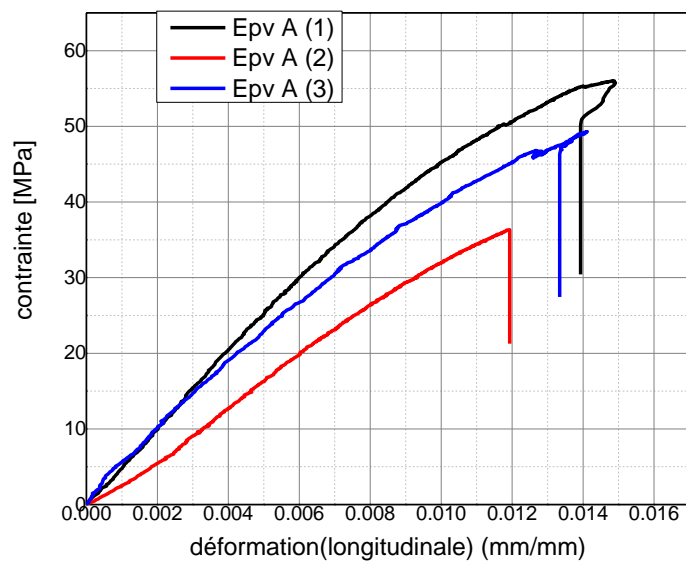
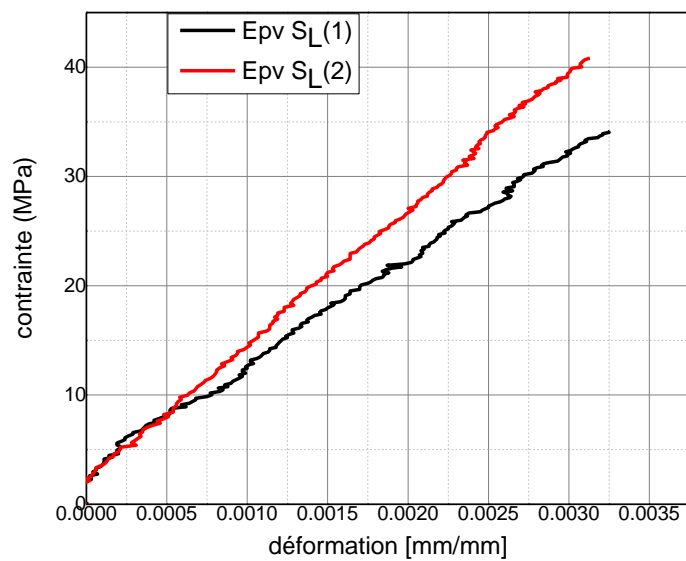
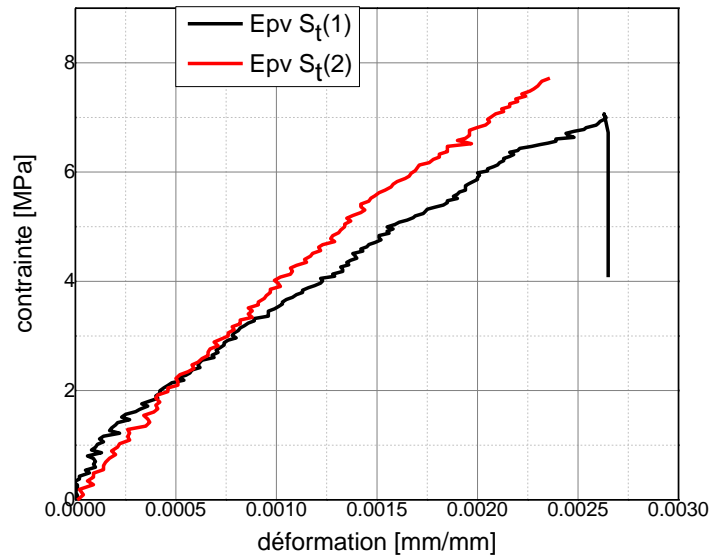


Fig.IV.6.Courbe de Contrainte - Déformation en traction du stratifié  $[45_2,-45_2]_s$





**Fig.IV.7.**Courbe  $\sigma$ -  $\varepsilon$  en traction d'une monocouche dans le sens des fibres**Fig.IV.8.**Courbe  $\sigma$ - $\varepsilon$  en traction dans le sens  $\perp$  aux fibres

#### IV.2.2. Discussions les courbes.

Les figures ci- dessus présentent les courbes contrainte-déformation dans les différents types de stratifiés (quatre couches) symétrique et asymétrique et une couche unidirectionnelles

1- Les deux figures IV.5 et IV.6 représentent la courbe contrainte-déformation pour les éprouvettes de 4 couches symétrique et asymétrique.

2- Les figures IV.7et IV.8 représentent la courbe contrainte-déformation pour les éprouvettes monocouches : la fig. IV.7 représente la courbe dans le sens des fibres ; cela va nous servir pour le calcul du module de Young dans le sens longitudinal  $E_t$ . et IV.8 – poule calcul dans le sens perpendiculaire aux fibres.

Les tableaux (IV.5, IV6, IV.7 et IV.8) représentent les valeurs du module d'élasticité et coefficient de poisson dans les différents types de stratifiés sollicités par la traction

**Tableau.IV.5.**Résultats de traction - taux de fibres  $M_f = (31.71 \pm 0.89) \%$ .

<i>Echant</i> A	Longueur L (mm)	Largeur b(mm)	Epaisseur h(mm)	EL(Mpa)	Coefficient de Poisson
1	151.4	20	3.06	3806.7	0.34
2	151	20	3	3215.6	0.37
3	151.8	20	3.7	3427.8	0.35
Moyenne				3483.367	0.355
Ecart type				299.4421	0.021213

**Tableau.IV.6.**Résultats de traction - taux de fibres  $M_f = (30.86 \pm 1.83) \%$ 

<i>Echant</i> B	Longueur L (mm)	Largeur (mm)	Epaisseur (mm)	EL(Mpa)	Coefficient de Poisson
1	151	20.9	3.4	3353.2	0.33
2	151	20	3.8	4234.3	0.37
3	151	20	4.33	3239.9	0.4
Moyenne				3609.13	0.36
Ecart type				544.366	0.03512

**Tableau.IV.7.**Résultats de traction - taux de fibres  $M_f = (29.35 \pm 0.24) \%$ 

<i>Echant</i> L	Longueur (mm)	Largeur (mm)	Epaisseur (mm)	EL(Mpa)	Coefficient de Poisson
1	190.5	24.6	1.6	9704.8	0.3
2	190.5	24	1.4	12431	0.35
Moyenne				11067.9	0.325
Ecart type				1927.71	0.03536

**Tableau.IV8 :** Résultats de traction - taux de fibres  $M_f = (30.63 \pm 1.63) \%$ 

$N_t$	Longueur (mm)	Largeur (mm)	Epaisseur (mm)	EL(Mpa)	Coefficient de Poisson
1	251	24.1	1.65	3226.5	0.33
2	251	24.7	1.32	2526.9	0.33
Moyenne				2876.7	0.33
Ecart type				494.692	0

---

---

# Conclusion générale

Notre travail consiste en l'étude des plaques composites aux fibres de verre longues obtenues par empilements de couches polyester-fibres de verre orientées différemment (l'orientation est déterminée par les angles que font les fibres avec l'axe longitudinal de la plaque). Le nombre de couches étudiées lui, aussi étant variable. A cet effet, nous avons procédé à la préparation et l'élaboration des plaques composites à base de résine polyester renforcée de fibres de verre longues(E) ; de différentes couches et orientations : symétriques et asymétriques ; et à partir desquelles nous avons découpé des éprouvettes destinées à l'étude des caractéristiques mécaniques du matériau.

A la suite de réalisation des essais de traction et de flexion, nous avons pu déterminer les caractéristiques suivantes : le module de Young, le coefficient de poisson à l'aide de technique vidéo-traction, ainsi que la contrainte et déformation à la rupture. En outre, lors de l'étude des plaques monocouches nous avons constaté que le module de Young dans le sens des fibres est proche de celui des fibres de verre, alors que dans le sens perpendiculaire aux fibres, il est proche de celui de la résine (polyester), ce qui est confirmé par la littérature.

### الخلاصة

إن عملنا هذا يكمن في دراسة الصفائح المركبة ذات الألياف الزجاجية الطويلة المرصوصة حسب اتجاهات مختلفة والمتكونة من عدة طبقات. من أجل هذا الغرض قمنا بإنجاز عدة صفائح مركبة من مادة البوليستر والألياف الطويلة (E) المرتبة حسب اتجاهات وزوايا مختلفة وقد رأينا أن نجز صفائح منها المتناظرة والغير المتناظرة، والتي تم من خلالها إعداد العينات المراد دراسة خصائصها الميكانيكية.

من خلال إجراء عدة تجارب منها على سبيل التحديد تجربة الشد والانحناء، حيث تمكنا من استخلاص الخصائص الميكانيكية التالية: معامل المرونة (معامل يونغ) ومعامل بواسون باستعمال تقنية فيديو الشد، وكذلك الإجهاد والتشوه عند الكسر. إضافة إلى ذلك عند دراستنا للصفائح المركبة ذات الطبقة الواحدة، وجدنا أن معامل يونغ في اتجاه الألياف الزجاجية قريب من معامل المرونة للألياف الزجاجية نفسها، أما في الاتجاه العمودي للألياف فهو قريب من معامل مادة البوليستر، وهذا يتفق إلى حد كبير مع النتائج الموجودة في كتب الاختصاص.

# Référence bibliographique

- [1].Berthelot J. M,«Matériaux composites : Comportement mécanique et analyse des structures », 4ème édition, 2010.
- [2].Bruno CASTANIE., et al, “Structure en matériaux composites stratifiés”, Institut Clément Ader, Technique de l’ingénieur, 2013.
- [3].Berthelot, J.-M., Matériaux composites: comportement mécanique et analyse des structures1999: Paris.
- [4].BERIBECHE. A, Analyse par la méthode des éléments finis du délaminage des matériaux composites stratifiés. Thèse de magister, Université de Batna 2002.
- [5].Boubakeur, T., Effet d’une ouverture sur le comportement d’une plaque composite Université de Biskra 2017.
- [6].Mlle BOUDJEMA H. Elaboration de matériaux composites biodégradables issus de ressources renouvelables, thèse de doctorat, Université d’Oran 2 , 2015-2016.
- [7].Yousef DJEBLOUN, « ETUDE DE LA RUPTURE EN MODE I D’OUVERTURE DES MATERIAUX COMPOSITES », Mémoire de magistère, Université Mohamed khider Biskra, 2004.
- [8].DANIEL. D, Les matériaux composites (conception, caractéristiques, méthodes de contrôle). Matériaux et techniques, n° 1-2. Janvier – février 1984.
- [9].CARMA « Glossaire des matériaux composites » Actualisation octobre 2006.
- [10].Nadia Behlouli, « les matériaux composites », cours des matériaux composites, Université de Strasbourg.
- [11].JoelCugnoni, « Identification par recalage modal et fréquentiel des propriétés constitutives de coques en matériaux composites », Thèse, Ecole Polytechnique fédérale de Lausanne, 2005.
- [12].Boubeker, R., Etude Expérimentale et Numérique du Comportement des Plaques Trouées en Matériaux Composites, 2016, Université Mohamed Khider-Biskra.
- [13].Molimard, J., *Mécanique des Matériaux composites*.EMsE Version, 2004.
- [14].Kollar, L.P. and G.S. Springer, *Mechanics of composite structures*2003: Cambridge university press.

## Référence bibliographique

---

- [15].BOUAZIZ. A, Etude du comportement mécanique des matériaux composites multidirectionnels verre-phénoliques et verre-polyester. Thèse de magister, Université de Annaba 1994.
- [16].BelhiGuerira, « Contribution dans l'exploration des phénomènes viscoélastiques non linéaires de composites thermoplastiques», Thèse de doctorat, université de Biskra, 2016.
- [17].Ahlam ZAINANE, ACHARD Aurélien, DIOP Aliou, « Rapport projet expérimental : Caractérisation de matériaux à base de bois », Option Mécanique et Matériaux, Promotion 2006
- [18].ASTM. 2005, Propriétés mécanique des composites dans la pratique des essais, D 790-81
- [19].Belhi Guerira, «Polycopie des résistances des matériaux pour deuxième année tronc commun», Polycopie, université de Biskra, 2017

## Référence bibliographique

---

### ملخص

إن عملنا هذا يكمن في دراسة الصفائح المركبة ذات الألياف الزجاجية الطويلة المرصوفة حسب اتجاهات مختلفة والمتكونة من عدة طبقات. من أجل هذا الغرض قمنا بإنجاز عدة صفائح مركبة من مادة البوليمر والألياف الطويلة (E) المرتبة حسب اتجاهات وزوايا مختلفة وقد رأينا أن ننجز عدة صفائح منها المتناظرة والغير المتناظرة، والتي تم من خلالها إعداد العينات المراد دراسة خصائصها الميكانيكية.

### Résumé

Notre travail consiste en l'étude des plaques composites aux fibres de verre longues obtenues par empilements de couches polyester-fibres de verre orientées différemment (l'orientation est déterminée par les angles que font les fibres avec l'axe longitudinal de la plaque). Le nombre de couches étudiées lui, aussi étant variable. A cet effet, nous avons procédé à la préparation et l'élaboration des plaques composites à base de résine polyester renforcée de fibres de verre longues(E) ; de différentes couches et orientations : symétriques et asymétriques ; et à partir desquelles nous avons découpé des éprouvettes destinées à l'étude des caractéristiques mécaniques du matériau.