

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITE BADJI MOKHTAR - ANNABA  
BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY



جامعة باجي مختار – عنابة

Faculté : TECHNOLOGIE

Département : GENIE MECANIQUE

Domaine : SCIENCES ET TECHNOLOGIES

Filière : GENIE MECANIQUE.

Spécialité : CONSTRUCTION MECANIQUE

## Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Thème:

**Etude du comportement mecanique en flexion trois points  
d'un stratifié chargé de poudre de fer pur**

Présenté par : *Hamaidia Badri*

Encadrant : *Chemami Abdennacer* Grade *MCA* Université *U-B-M-A*

## Jury de Soutenance :

Benamira Mohamed	MCB	U-B-M-A	Président
Chemami Abdennacer	MCA	U-B-M-A	Encadrant
Bey Kamel	Professeur	U-B-M-A	Examineur

## Remerciements

---

### *Remerciements*

*Mes remerciements avant tout à ALLAH qui m'a donné la force et la volonté pour Pouvoir finir ce mémoire de fin d'études.*

*En premier lieu, je tiens aussi à exprimer ma gratitude à mon Directeur de mémoire Pr. ABDENNACER CHEMAMI pour la confiance, les encouragements, les précieux conseils qu'il m'a accordés durant ce travail.*

*Je tiens également à remercier le Pr. K. BEY, Dr. M. BENNAMIRA pour avoir accepté d'évaluer mon travail.*

*Mes remerciements les plus s'adressent à ma mère et mon père qui a beaucoup sacrifié pour que puisse atteindre mon but, celui de réaliser ce travail.*

## *Dédicaces*

*Je dédie ce mémoire à :*

*Mes chers parents pour tous les sacrifices consentis, pour leur soutien durant toutes mes années d'études,*

*Toute ma famille, en particulier mon frère Khalil et tous mes chers amis,*

*Ma reconnaissance est également formulée envers tous mes enseignants et tous les employés de l'administration de département de Génie Mécanique.*

## Résumé

Cette étude présente une analyse du comportement mécanique en flexion statique trois points d'un composite dont la matrice est une résine époxy chargée par une poudre de fer pur et renforcée par de la fibre de verre sous forme de mat. Ce matériau composite a été élaboré par un moulage au contact de plaques de dimension (300x300x4) mm<sup>3</sup>. Les éprouvettes pour ce type d'essai ont été découpées par un disque diamanté selon la norme ISO 14125. Trois types de composites, différenciés par le taux massique de poudre de fer pur (10%, 15%, et 25%) ont été réalisés. Les essais de flexion trois points statique monotone, ont permis de déterminer les caractéristiques mécaniques nécessaires et ont mis en évidence leur comportement mécanique et l'influence du taux massique de charge. L'observation des faciès de rupture des éprouvettes testées a défini les différents modes d'endommagement jusqu'à la ruine.....

Mots clés : composite / résine époxy / poudre de fer pur / comportement mécanique / endommagement.

## Abstract

This study presents an analysis of the mechanical behavior in three-point static bending of a composite whose matrix is an epoxy resin filled with a pure iron powder and reinforced with fiberglass in the form of a mat. This composite material was developed by molding in contact with plates of dimension (300x300x4) mm<sup>3</sup>. The specimens for this type of test were cut by a diamond disc according to the ISO 14125 standard. Three types of composites, differentiated by the mass content of pure iron powder (10%, 15%, and 25%) were produced. The monotonous static three-point bending tests made it possible to determine the necessary mechanical characteristics and highlighted their mechanical behavior and the influence of the mass rate of load. The observation of the fracture facies of the specimens tested defined the different modes of damage up to ruin.....

### ملخص

تقدم هذه الدراسة تحليلاً للسلوك الميكانيكي في الانحناء الساكن بثلاث نقاط لمركب تكون مصفوفته عبارة عن راتنج إيبوكسي مملوءة بمسحوق حديد نقي ومدعومة بالألياف الزجاجية على شكل حصيرة. تم تطوير هذه المادة المركبة بالقولبة الملامسة لألواح ذات أبعاد (300 × 300 × 4) مم<sup>3</sup>. تم قطع عينات هذا النوع من الاختبار بواسطة قرص ماسي وفقاً لمعيار ISO 14125 ، وتم إنتاج ثلاثة أنواع من المركبات متباينة حسب المحتوى الكتلي لمسحوق الحديد النقي (10% ، 15% ، 25%). أتاحت اختبارات الانحناء الثابتة ذات الثلاث نقاط الرتيبة تحديد الخصائص الميكانيكية الضرورية وسلطت الضوء على سلوكها الميكانيكي وتأثير معدل الحمل الكتلي. حددت ملاحظة أوجه الكسر للعينات المختبرة أنماط الضرر المختلفة حتى الخراب .....

الكلمات المفتاحية: مركب / راتنج إيبوكسي / مسحوق حديد نقي / سلوك ميكانيكي / تلف.

# Sommaire

---

## Sommaire

Remerciements .....	i
Dédicace .....	ii
Résumé .....	iii
Sommaire .....	v
Table des figures .....	viii
Table des tableaux .....	x
<b>Introduction générale .....</b>	<b>1</b>
<b>I. Chapitre I : Généralité sur les matériaux composites .....</b>	<b>2</b>
<b>I.1. Introduction .....</b>	<b>3</b>
<b>I.2. Définition .....</b>	<b>3</b>
<b>I.3. Constituants des matériaux composites .....</b>	<b>3</b>
<b>I.3.1. Le renfort .....</b>	<b>4</b>
<b>I.3.1.1. Architecture des renforts .....</b>	<b>4</b>
<b>I.3.2. La matrice .....</b>	<b>7</b>
<b>I.3.3. Les charges et les additifs .....</b>	<b>9</b>
<b>I.3.3.1. Les charges .....</b>	<b>9</b>
<b>I.3.3.2. Les additifs .....</b>	<b>10</b>
<b>I.4. Mise en œuvre et architecture des matériaux composites .....</b>	<b>10</b>
<b>I.4.1. Moulage au contact .....</b>	<b>10</b>
<b>I.4.2. Moulage par projection simultanée .....</b>	<b>10</b>
<b>I.4.3. Moulage sous vide .....</b>	<b>11</b>
<b>I.4.4. Moulage par injection de résine .....</b>	<b>12</b>
<b>I.4.5. Moulage par centrifugation .....</b>	<b>12</b>
<b>I.5. Structure des matériaux composites .....</b>	<b>12</b>
<b>I.5.1. Les monocouches .....</b>	<b>13</b>
<b>I.5.2. Les Stratifiés .....</b>	<b>13</b>
<b>I.5.3. Sandwichs .....</b>	<b>14</b>
<b>I.6. Les domaines d'utilisation .....</b>	<b>14</b>
<b>I.7. La loi de mélange pour les composites stratifiés .....</b>	<b>14</b>
<b>II. Chapitre II: comportement mécanique des stratifiés en flexion 03 points .....</b>	<b>17</b>
<b>II.1. Introduction .....</b>	<b>18</b>

# Sommaire

---

<b>II.2. Les caractéristiques du mélange renfort-matrice.....</b>	<b>18</b>
<b>II.2.1. La teneur en masse .....</b>	<b>18</b>
<b>II.2.2. La teneur en volume .....</b>	<b>19</b>
<b>II.2.3. L'épaisseur du composite stratifié .....</b>	<b>19</b>
<b>II.2.4. La masse volumique .....</b>	<b>19</b>
<b>II.2.5. coefficient de Poisson .....</b>	<b>20</b>
<b>II.2.6. Module d'élasticité composite stratifié .....</b>	<b>20</b>
<b>II.2.6.1. Le module d'élasticité longitudinal .....</b>	<b>20</b>
<b>II.2.6.2. Le module d'élasticité transversal .....</b>	<b>20</b>
<b>II.2.7. Module de cisaillement .....</b>	<b>21</b>
<b>II.2.8. Module de glissement .....</b>	<b>21</b>
<b>II.2.9. Module de compressibilité.....</b>	<b>21</b>
<b>II.2.10. Module de la compression latéral .....</b>	<b>21</b>
<b>II.2.11. Résistance à la rupture d'un composite stratifié .....</b>	<b>22</b>
<b>II.3. Mécanisme d'endommagement .....</b>	<b>22</b>
<b>II.3.1. Introduction .....</b>	<b>22</b>
<b>II.3.2. Les divers mécanismes de rupture dans un composite unidirectionnel.....</b>	<b>22</b>
<b>II.3.3. Microfissuration matricielle .....</b>	<b>22</b>
<b>II.3.4. Décohésion fibre matrice .....</b>	<b>23</b>
<b>II.3.5. Rupture de fibre .....</b>	<b>24</b>
<b>II.3.6. Délaminage .....</b>	<b>25</b>
<b>II.3.7. Moyens d'identification de l'endommagement.....</b>	<b>26</b>
<b>II.4. Théorie des poutres stratifiées sollicitées en flexion 3 points .....</b>	<b>26</b>
<b>II.4.1. Introduction.....</b>	<b>26</b>
<b>II.4.2. Principe d'essai de flexion .....</b>	<b>27</b>
<b>II.4.2.1. Mécanisme de rupture .....</b>	<b>27</b>
<b>II.4.2.2. Machines de flexion .....</b>	<b>28</b>
<b>II.4.2.3. Eprouvette de flexion .....</b>	<b>28</b>
<b>II.4.3. Expression des résultantes et des moments .....</b>	<b>28</b>
<b>II.4.3.1. Résultantes en membrane .....</b>	<b>28</b>
<b>II.4.3.2. Moments de flexion et de torsion .....</b>	<b>30</b>

# Sommaire

---

<b>II.4.4. Equation constitutive</b> .....	31
<b>II.4.5. Matrice de rigidité</b> .....	32
<b>II.4.6. théorie classique des stratifiés</b> .....	33
<b>II.4.6.1. Expressions générales</b> .....	33
<b>II.4.7. Application à la flexion 3 points</b> .....	36
<b>III. Chapitre III : Etude expérimentale</b> .....	39
<b>III.1. Mise en œuvre des éprouvettes</b> .....	40
<b>III.2. Essai de flexion 3 points</b> .....	42
<b>III.2.1. Banc d'essais</b> .....	42
<b>III.2.2. Résultats expérimentaux des essais statiques de flexion trois points</b> .....	43
<b>III.2.3. Interprétation</b> .....	51
<b>III.3. Etude de l'endommagement</b> .....	52
<b>Conclusion générale</b> .....	56
<b>Bibliographie</b> .....	57

# Liste des figures

---

## Liste des figures

Figure (I-1) : Matériau composite .....	3
Figure (I-2) : Diverses formes et origines de renforts .....	4
Figure (I-3) : Procédé d'étirage des fibres de verre.....	6
Figure (I-4) : Différentes familles de matrice .....	8
Figure (I-5): Principe du moulage au contact.....	10
Figure (I-6): Principe du moulage par projection simultanée .....	11
Figure (I-7): Principe de moulage par infusion.....	11
Figure (I-8) : Principe de moulage par injection de résine.....	12
Figure (I-9) : Principe de moulage par centrifugation.....	12
Figure (I-10) : Composite monocouche .....	13
Figure (I-11):Plaque stratifiée .....	13
Figure (I-12): Composite sandwich.....	14
Figure (I-13): Modélisation par un système de ressorts des propriétés en traction d'un composite stratifié .....	15
Figure (I-14) : Modélisation des bornes d'après la Loi des Mélanges.....	16
Figure (II-1) : Rupture transverse de la matrice .....	23
Figure (II-2) : Rupture longitudinal de la matrice.....	23
Figure (II-3) : Décohésion fibre-matrice.....	24
Figure (II-4) : Rupture fibre .....	25
Figure (II-5) : Mécanisme d'endommagement observés dans les stratifiés .....	25
Figure (II-6) : Flexion 3 points .....	27
Figure (II-7) : Localisation de la rupture.....	27
Figure (II-8) : Machine universelle en montage de flexion.....	28
Figure(II-9) : Dimensions des éprouvettes de flexion.....	28

## Liste des figures

---

Figure (II-10): Schématisation des résultantes en membrane des actions exercées sur un élément de stratifié .....	29
Figure (II-11) : Schématisation des moments de flexion et de torsion .....	31
Figure (II-12) : Elément poutre .....	36
Figure (III-1) : Schéma simplifié du procédé de moulage au contact .....	40
Figure (III-2): Machine d'essais Zwick/Roell Z020 [20KN].....	42
Figure (III-3): Géométrie des éprouvettes .....	43
Figure (III-4): La mise en place des éprouvettes.....	43
Figure (III-5) : courbe d'évolution charge déplacement St [10%].....	44
Figure (III-6) : Courbe d'évolution moyenne charge déplacement St [10%] .....	44
Figure (III-7) : courbe d'évolution charge déplacement St [15%].....	45
Figure (III-8) : Courbe d'évolution moyenne charge déplacement St [15%].....	46
Figure (III-9) : courbe d'évolution charge déplacement St [25%].....	47
Figure (III-10) : Courbe d'évolution moyenne charge déplacement St [25%] .....	47
Figure (III-11) : Comparaison des courbes moyennes de l'évolution charge déplacement des stratifiés St [10%], [15%] et [25%].....	51
Figure (III-12) : microscope optique .....	52
Figure (III-13) : Les faciès de rupture dans le stratifié [10%].....	53
Figure (III-14) : Les faciès de rupture dans le stratifié [15%] .....	54
Figure (III-15) : Les faciès de rupture dans le stratifié [25%].....	55

# Liste des tableaux

---

## Liste des tableaux

Tableau (I.1) : Caractéristiques mécaniques des fibres de verre .....	<b>6</b>
Tableau (III.1): caractéristiques principales de la résine.....	41
Tableau (III.2) : caractéristiques principales de la fibre de verre .....	41
Tableau (III.3) : caractéristiques de la poudre de fer pur .....	<b>42</b>
Tableau (III.4) : Résultats des essais statique d'éprouvette à 10% de poudre de fer .....	45
Tableau (III.5) : Statistiques des essais statique d'éprouvette à 10% de poudre de fer .....	45
Tableau (III.6) : Résultats des essais statique d'éprouvette à 15% de poudre de fer .....	<b>46</b>
Tableau (III.7) : Statistiques des essais statique d'éprouvette à 15% de poudre de fer .....	46
Tableau (III.8) : Résultats des essais statique d'éprouvette à 25% de poudre de fer .....	48
Tableau (III.9) : Statistiques des essais statique d'éprouvette à 25% de poudre de fer .....	<b>48</b>
Tableau (III.10) : les valeurs des $\Delta F$ et $\Delta \delta$ et leur taux de variation $\frac{\Delta F}{\Delta \delta}$ St [10%] .....	49
Tableau (III.11) : les valeurs des $\Delta F$ et $\Delta \delta$ et leur taux de variation $\frac{\Delta F}{\Delta \delta}$ St [15%] .....	49
Tableau (III.12) : les valeurs des $\Delta F$ et $\Delta \delta$ et leur taux de variation $\frac{\Delta F}{\Delta \delta}$ St [25%] .....	49
Tableau (III.13) : résultat de contrainte et module de flexion St [10%].....	50
Tableau (III.14) : résultat de contrainte et module de flexion St [15%].....	<b>50</b>
Tableau (III.15) : résultat de contrainte et module de flexion St [25%].....	50

# Introduction générale

---

## Introduction générale

Le matériau a souvent eu un 'rôle simplifié' dans la mise en place et la réussite d'un projet tant que les techniques de fabrication, de dimensionnement, de maîtrise des propriétés apparaissaient performantes et suffisantes et que la prédictibilité des comportements assurait au concepteur une approche sécurisante. Inévitablement, cette exigence impose la nécessité de stabiliser et renforcer les surfaces minces pour leur permettre de supporter des efforts souvent complexes et combinés. Pour évaluer une nouvelle structure, le concepteur doit prendre en compte un certain nombre de considérations importantes. La nouvelle structure doit être, économique à construire et à faire fonctionner, fiable et confortable. Il existe évidemment plusieurs façons de satisfaire à ces exigences et le matériau de construction joue là un rôle prépondérant.

Par ailleurs, le développement des technologies modernes exige que l'on utilise des matériaux présentant des propriétés mécaniques élevées spécifiques à leur emploi, mais dont les masses volumiques soient faibles. L'objectif est notamment de réduire la masse des structures. Les matériaux composites sont des matériaux qui répondent aux exigences précédentes. Ils sont des matériaux solides, inhomogènes et anisotropes, constitués par l'association à l'échelle microscopique de deux ou plusieurs autres matériaux aux caractéristiques complémentaires. Cette association leur confère à l'échelle macroscopique un ensemble de propriétés notamment mécanique, que chacun des constituants pris séparément ne possède pas. En raison de leur faible densité, grande résistance, rigidité importante et de leur excellente durabilité, les matériaux composites ont d'abord été utilisés dans de nombreuses composantes structurales, notamment dans le domaine de l'aéronautique. De nos jours, la diminution de leurs coûts de production permet l'utilisation de ces matériaux dans des applications de plus en plus variées (automobile, navigation, construction, etc.).

Le cadre général de notre travail s'articule sur l'étude du comportement mécanique en flexion trois(3) points statique de trois types de stratifiés (fibre de verre mat/époxy chargée de poudre de fer pure) différenciés par le taux massique de poudre de fer pur (10%, 15%, et 25%). Le manuscrit est divisé en trois chapitres, le premier chapitre est constitué d'une présentation des matériaux composites et leurs caractéristiques générales, leur classification, leurs constituants, leurs domaines d'applications ainsi que les procédés de mise en œuvre.

Le second chapitre étant consacré à la formulation décrivant le comportement mécanique des matériaux composites et leurs mécanismes d'endommagement et de rupture. Le dernier chapitre est réservé à l'étude expérimentale du comportement mécanique en flexion trois (03) points statique du stratifié fibre de verre mat/époxy chargée de poudre de fer pure. Les résultats des essais mécaniques effectués sur ce matériau sont discutés afin de calculer la contrainte de flexion et le module d'élasticité en flexion pour chaque type de stratifié ainsi que leur comparaison. Par suite, des observations réalisées par microscope optique des faciès endommagées des éprouvettes testées sous sollicitations statiques ont été analysées. L'ensemble de travail se termine par une conclusion générale sur les résultats trouvés.

**Chapitre I**

**Généralité sur les matériaux  
composites**

# Généralité sur les matériaux composites

---

## I.1. Introduction :

Il existe différentes familles de matériaux : les métaux, les plastiques, les composites... Les matériaux composites ne sont pas une nouveauté, ils ont été utilisés par l'homme depuis très longtemps, citons par exemple le bois, le béton. [1]

La première partie de ce chapitre est consacrée aux différentes compositions des matériaux composites. Tandis que la seconde partie, traite les différents types de mise en œuvre de tels matériaux et l'étude de leurs structures.

## I.2. Définition :

Un matériau composite est constitué de l'assemblage de deux matériaux de natures différentes, se complétant et permettant d'aboutir à un matériau dont l'ensemble des performances est supérieur à celui des composants pris séparément [2]. Les matériaux composites disposent d'éventualités importantes par rapport aux matériaux traditionnels. Ils possèdent de nombreux avantages fonctionnels :

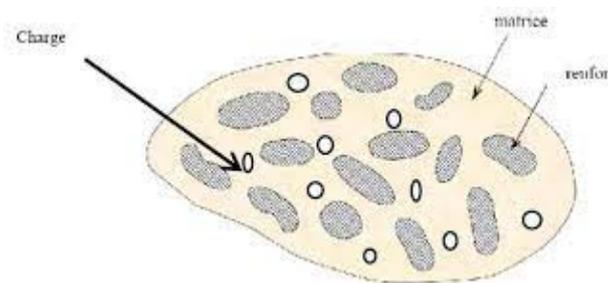
- ✓ Légèreté
- ✓ Résistance mécanique et chimique
- ✓ Maintenance réduite
- ✓ Liberté de forme et une bonne isolation électrique

## I.3. Constituants des matériaux composites :

En général les constituants d'un matériau composite sont :

- ✓ La matrice
- ✓ Le renfort
- ✓ Les charges et

les additifs



**Figure (I-1) : Matériau composite [1]**

## I.3.1. Le renfort :

C'est le principal porteur constitutif dans le composite (forme, volume). Il confère aux composites leurs caractéristiques mécaniques : rigidité, résistance à la rupture, dureté.

Les renforts peuvent être d'origine minérale (verre, bore, céramique...) ou organique(carbone ou aramide). Les plus employées sont les fibres de verre. Les fibres de carbone sont privilégiées [3].

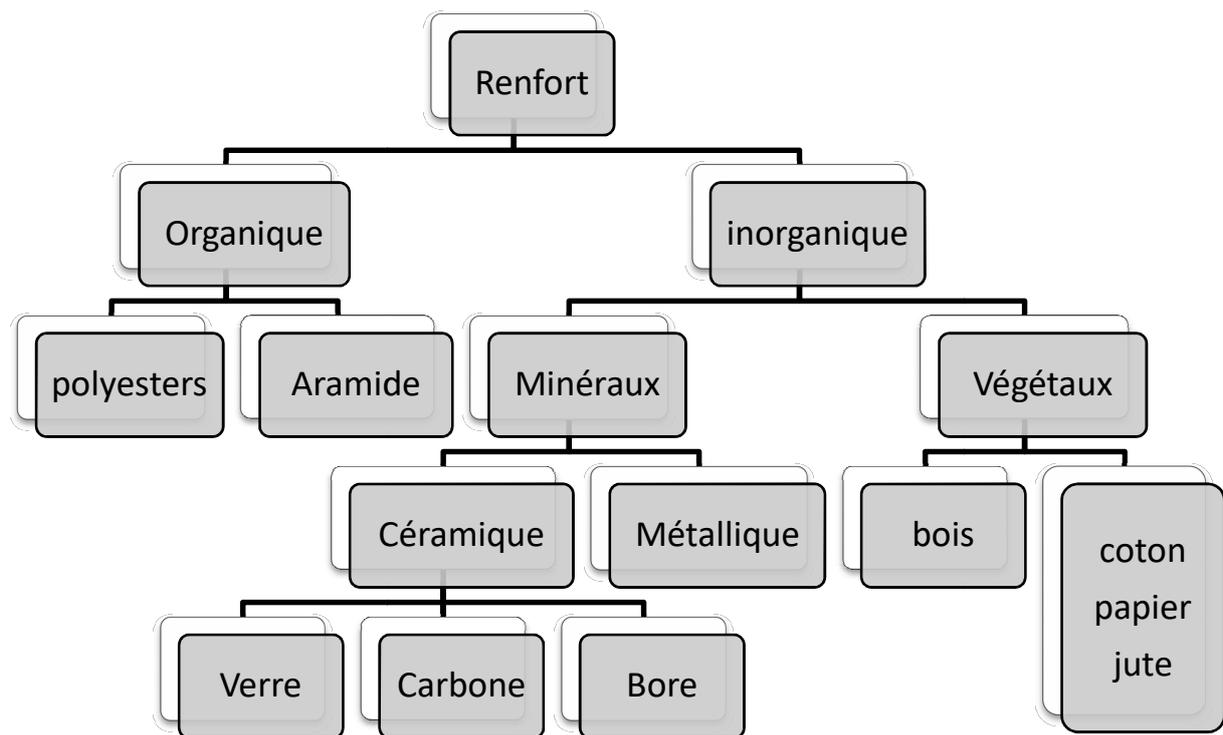


Figure (I-2) : Diverses formes et origines de renforts.

### I-3-1-1-Architecture des renforts : [4]

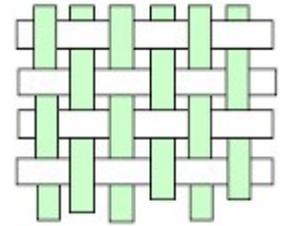
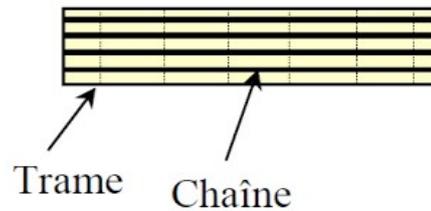
Il existe différentes géométries et textures de renforts

- **Les unidirectionnels (UD) :**

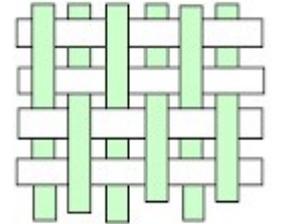
Dans une nappe UD, les fibres sont assemblées parallèlement les unes par rapport aux autres à l'aide d'une trame très légère. Taux de déséquilibre très grand.

Les tissus se composent de fils de chaîne et de trames perpendiculaires entre eux. Le mode d'entrecroisement ou armure les caractérise.

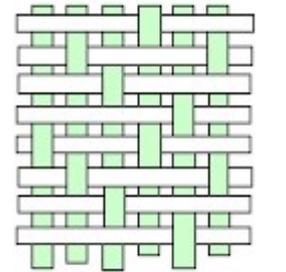
## Généralité sur les matériaux composites



- **Toile ou taffetas** : Chaque fil de chaîne passe dessus puis dessous chaque fil de trame, et réciproquement. Le tissu présente une bonne planéité et une relative rigidité, mais est peu déformable pour la mise en œuvre. Les nombreux entrecroisements successifs génèrent un embuvage important et réduisent les propriétés mécaniques.



- **Serge** : Chaque fil de chaîne flotte au-dessus de plusieurs ( $n$ ) fils de trame et chaque fil de trame flotte au-dessus de ( $m$ ) fils de chaîne. Armure de plus grande souplesse que le taffetas ayant une bonne densité de fils. Ci-contre, un sergé 2/2.



- **Satin** : Chaque fil de chaîne flotte au-dessus de plusieurs ( $n-1$ ) fils de trame et réciproquement. Ces tissus ont des aspects différents de chaque côté. Ces tissus sont assez souples et adaptés à la mise en forme de pièces à surfaces complexes. Ce type de tissu présente une forte masse spécifique.

a) **fibre de verre** : Elle constitue le renfort essentiel des composites de grande diffusion. Elle est obtenue à partir de sable (silice) et d'additifs (alumine, carbonate de chaux, magnésie, oxyde de bore). On distingue trois types de fibres [4] :

- ✓ E : pour les composites de grande diffusion et les applications courantes ;
- ✓ R : pour les composites hautes performances ;
- ✓ D : pour la fabrication de circuits imprimés (propriétés diélectriques).

Les caractéristiques mécaniques des fibres de verre décrites ci-dessus sont résumées dans le Tableau (I-1).

# Généralité sur les matériaux composites

Tableau (I-1) : Caractéristiques mécaniques des fibres de verre [4]

Caractéristiques	Type E	Type D	Type C	Type R	Type S
Contrainte à la rupture (Mpa)	3500	2450	2800	4650	4650
Moduled'Young(Gpa)	73.5	52.5	70	86.5	86.5
Allongement à la rupture (%)	4.5	4.5	4	5.3	5.3

○ **Fabrication des fibres de verre :**

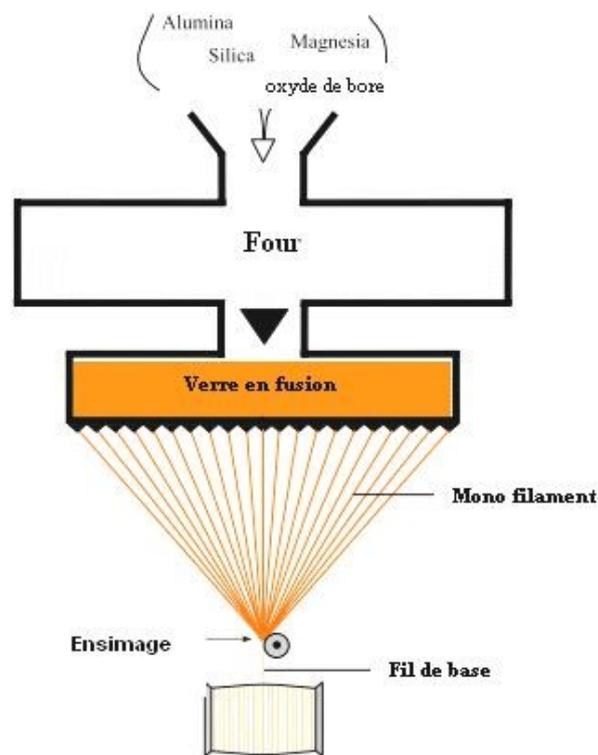
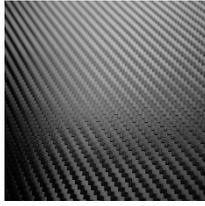


Figure (I-3) : Procédé d'étirage des fibres de verre [1]

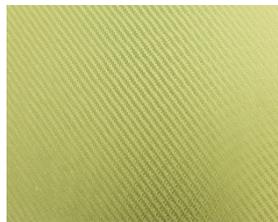
**b) Fibre de carbone :** C'est la fibre la plus utilisée dans les applications hautes performances. Elle est obtenue à partir de PAN (Poly Acrylonitrile) ou à partir de Brai.

## Généralité sur les matériaux composites

---



- c) **Fibre d'aramide** : Souvent appelée KEVLAR, la fibre d'aramide est issue de la chimie des polyamides aromatiques. Il est possible de trouver deux types de fibres d'aramide de rigidités différentes :
- Les fibres à bas module : utilisées pour les câbles et les gilets pare-balles
  - Les fibres haut module : employées dans le renforcement pour les composites à haute performance.



- d) **Fibre de bore** : Fibre de haut module et insensible à l'oxydation à hautes températures, elles sont obtenues par dépôt en phase gazeuse sur un substrat en tungstène [2].
- e) **Fibre de silicium** : Elles sont produites comme le verre, par fusion, et sont essentiellement utilisées pour leur haute tenue chimique et thermique dans les tuyères pour moteur de fusée [2].

### I-3-2 La matrice :

La matrice permet de lier les fibres du renfort fibreux entre elles, ainsi que de répartir les efforts. Dans un grand nombre de cas, la matrice constituant le matériau composite est une résine polymère. On distingue plusieurs familles de matrice.

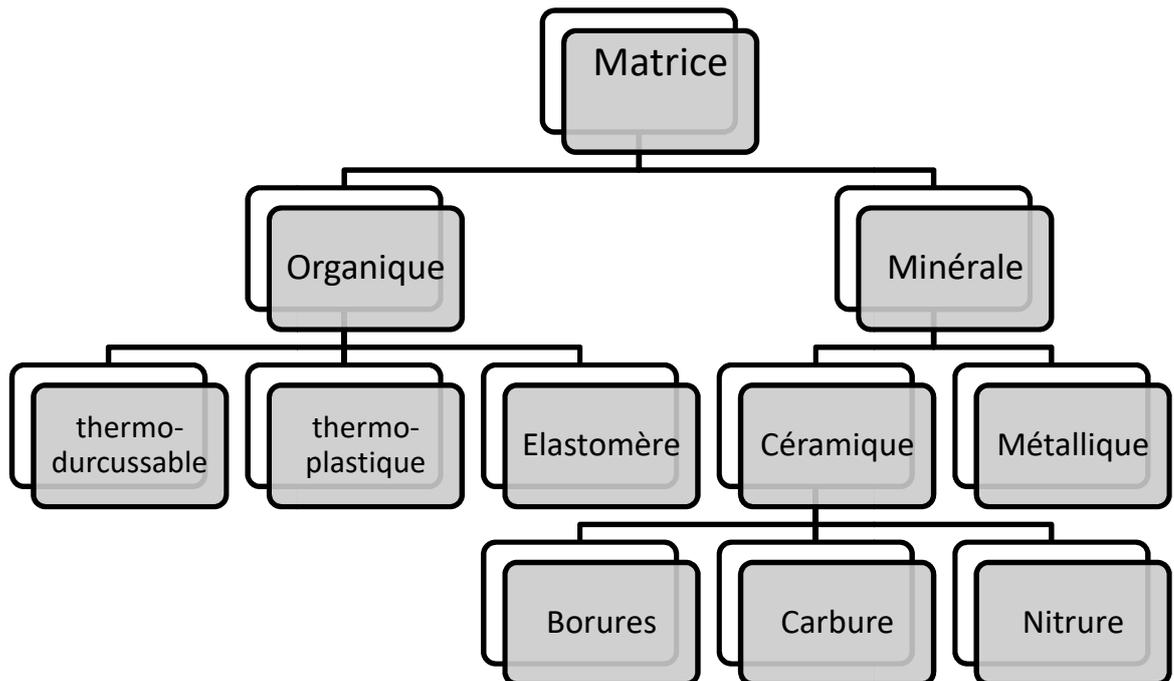


Figure (I-4) : Différentes familles de matrice.

## a) Résines thermodurcissables :

Les résines thermodurcissables ont des propriétés mécaniques élevées (traitement thermique ou physico-chimique). Ces résines ont donc la particularité de ne pouvoir être mises en forme qu'une seule fois. Les principales résines thermodurcissables utilisées dans la mise en œuvre des matériaux composites sont par ordre décroissant en tonnage : les résines polyesters insaturées, les résines de condensation, les résines époxydes.

### a)-1- - Les résines époxydes : [5]

Les résines les plus utilisées après les résines polyesters insaturées sont les résines époxydes. Elles ne représentent cependant que 5 % du marché composite, à cause de leur prix élevé (de l'ordre de cinq fois plus que celui des résines polyesters) [1].

Du fait de leurs bonnes caractéristiques mécaniques, les résines époxydes, généralement utilisées sans charges, sont les matrices des composites à hautes performances (constructions aéronautiques, espace, missiles, etc.).

Les caractéristiques mécaniques générales des résines époxydes sont les suivantes :

- ✓ Masse volumique 1 100 à 1 500 kg/m<sup>3</sup>
- ✓ Module d'élasticité en traction 3 à 5 GPa

## Généralité sur les matériaux composites

---

- ✓ Contrainte à la rupture en traction 60 à 80 MPa
- ✓ Contrainte à la rupture en flexion 100 à 150 MPa
- ✓ Allongement à la rupture 2 à 5 %
- ✓ Résistance au cisaillement 30 à 50 MPa
- ✓ Température de fléchissement sous charge 290 °C

### b) Résines thermoplastiques :

Ce sont des polymères pouvant être alternativement ramollis par chauffage et durcis par refroidissement dans un intervalle de température spécifique du polymère étudié. Les résines thermoplastiques présentent l'aptitude à l'état ramolli, de se mouler aisément par plasticité [1].

### c) Résines thermostables :

Ce sont des polymères présentant des caractéristiques mécaniques stables sous des pressions et des températures élevées (>200°C) appliquées de façon continue. Cette propriété est mesurée en déterminant la température que peut supporter la résine durant 2000h sans perdre la moitié de ses caractéristiques mécaniques. [1]

### I-3-3 Les charges et les additifs : [1]

#### I-3-3-1-les charges :

- **Charge renforçant :**

L'objet de l'incorporation de charges renforçants est d'améliorer les caractéristiques mécaniques de la résine. Ces charges peuvent être classées suivant leur forme géométrique en

- ✓ Charges sphérique
- ✓ Charges non sphérique

- **Charge non renforçantes :**

Les charges non renforçantes ont pour rôle soit de diminuer le coût des résines en conservant les performances des résines, soit d'améliorer certaines propriétés des résines.

Parmi ces classes on trouve :

- ✓ Lubrifiants et agents de démoulage
- ✓ Pigments et colorants
- ✓ Agents anti-retrait
- ✓ agents anti-ultraviolets

## I-3-3-2-les additifs : [1]

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

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

## I.4. Mise en œuvre et architecture des matériaux composites :

### I-4-1- Moulage au contact : [1]

Procédé manuel pour la réalisation de pièces à partir de résines thermodurcissables, à température ambiante et sans pression. Les renforts sont déposés sur le moule et imprégnés de résine liquide, accélérée et catalysée. Après durcissement de la résine, la pièce est démoulée et détournée.

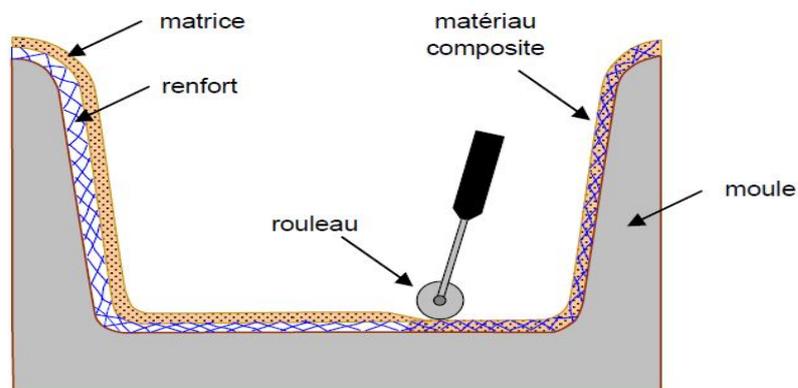


Figure (I-5): Principe du moulage au contact [1].

### I-4-2- Moulage par projection simultanée : [4]

Procédé manuel ou robotisé permettant la réalisation de pièces à partir de résines thermodurcissables à température ambiante et sans pression. Les matières premières sont mises en œuvre à l'aide d'une machine dite "de projection" comprenant :

- ✓ un dispositif de coupe - projection du renfort (fibre)
- ✓ un ou deux pistolets projetant simultanément la résine

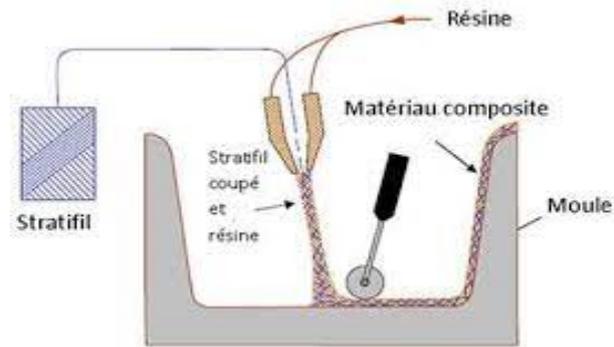


Figure (I-6): Principe du moulage par projection simultanée [1].

### I-4-3- Moulage sous vide : [4]

Le moulage sous vide s'effectue entre moule et contre-moule rigide, semi-rigide ou souple suivant la technologie de mise en œuvre.

Le renfort (mat, tissu, préforme) est placé à l'intérieur du moule ; la résine catalysée est versée sur le renfort. On utilise la pression qui s'exerce sur le moule lors de la mise sous vide pour répartir la résine et imprégner le renfort.

La résine peut également être injectée par l'aspiration consécutive au vide.

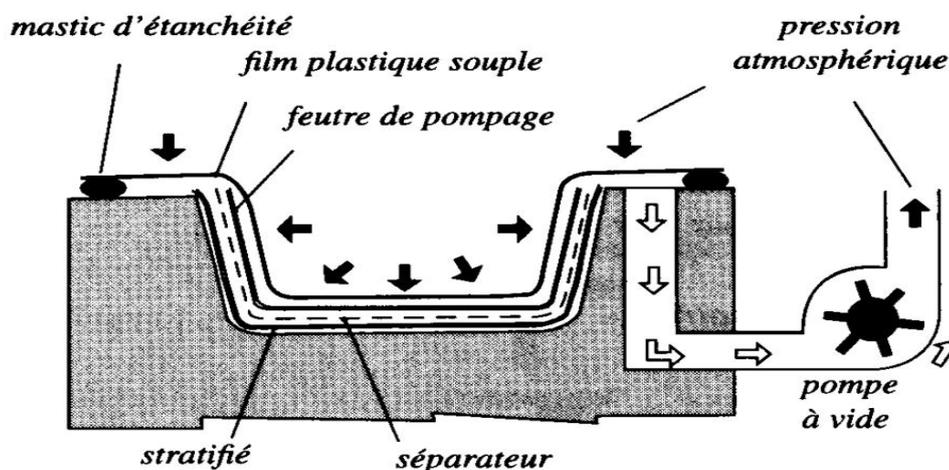


Figure (I-7): Principe de moulage par infusion [1].

### Avantages et inconvénients :

- **Avantages :**
  - Taux de renfort pouvant atteindre 65 %.
  - Bon compactage des tissus
  - Bonne imprégnation
- **Inconvénients :**
  - Difficulté de mise en œuvre et de la gestion des paramètres
  - Matériel non réutilisable

## I-4-4- Moulage par injection de résine :

Le moulage par injection de résine RTM (Résine Transfert Molding). Une nappe de fibre (tissus, mats) est déposée dans un moule fermé étanche et la résine est injectée à basse.

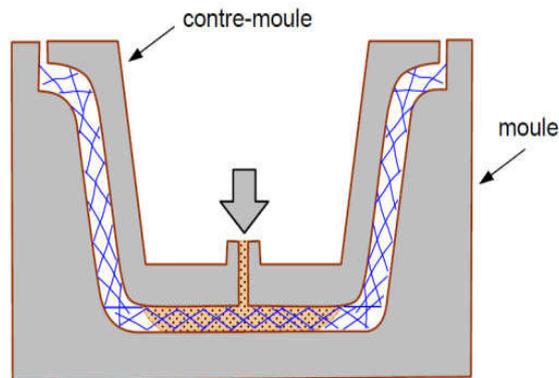


Figure (I-8) : Principe de moulage par injection de résine [1].

## I-4-5- Moulage par centrifugation:

Procédé de moulage limité aux enveloppes cylindriques. Le renfort (fibres longues coupées) et la résine sont déposés dans un moule cylindrique chauffé tournant à grande vitesse.

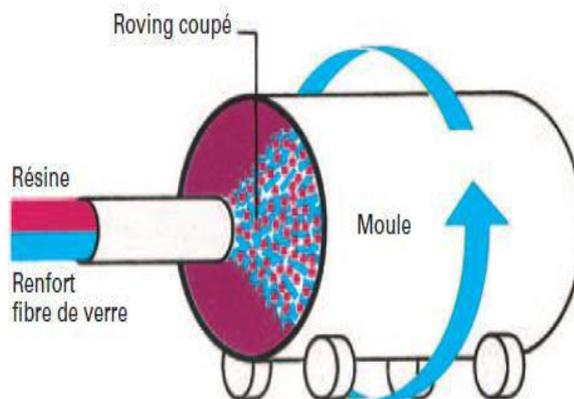


Figure (I-9) : Principe de moulage par centrifugation [1].

## I.5. Structure des matériaux composites :

Les structures des matériaux composites peuvent être classées en trois types

- Les monocouches
- Les stratifiées
- Les sandwichs

## I-5-1- Les 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. [6]

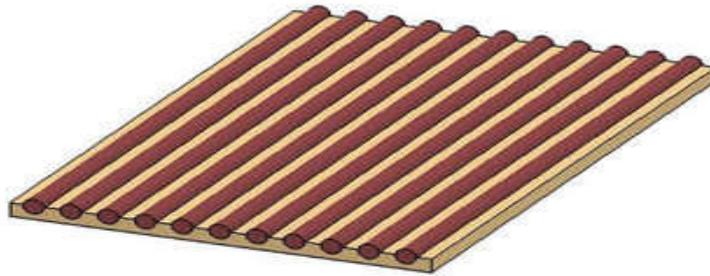


Figure (I-10) : Composite monocouche.

## I-5-2- Les 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-12). 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. [7]

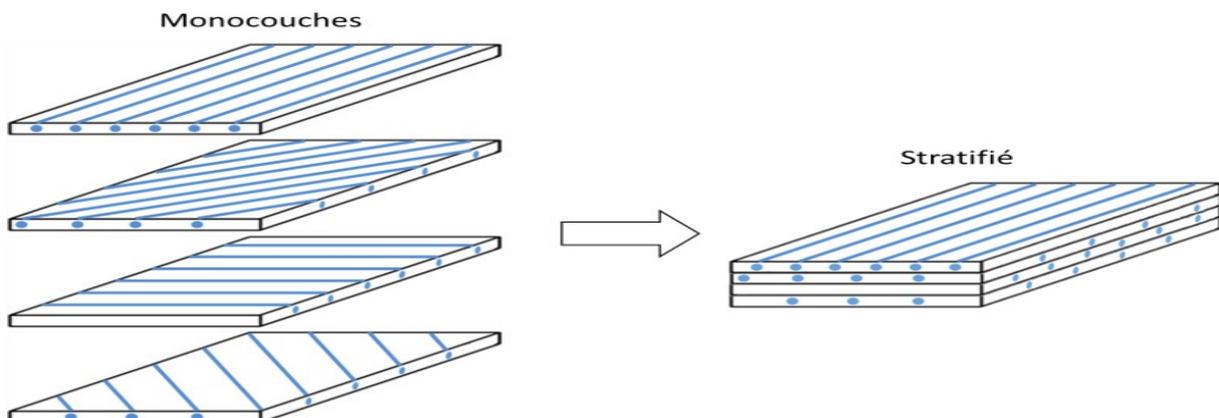


Figure (I-11):Plaque stratifiée.

## 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. [4]



**Figure (I-12): Composite sandwich.**

## I.6. Les domaines d'utilisation :[7]

Les matériaux composites de nos jours prennent une place prépondérante dans différents domaines, parmi les domaines on a :

- ✓ Électricité et électronique
- ✓ Bâtiment et travaux publics
- ✓ Transports routiers, ferroviaires, maritimes, aériens et spatiaux (notamment militaire)
- ✓ Santé (instrumentation médicale)

## I.7. La loi de mélange pour les composites stratifiés :

Les déformations des matériaux homogènes et isotropes peuvent être décrites assez simplement à l'aide des modules d'élasticité et des contraintes de déformation, qui sont les propriétés de base des matériaux bruts. Dans le cas des composites, chaque élément joue un rôle différent et c'est l'association de ces propriétés qui confère au matériau final ses caractéristiques propres. Bien que ces caractéristiques finales soient le résultat d'interactions

## Généralité sur les matériaux composites

complexes entre le renfort et la matrice, il est possible d'en donner une estimation simple à l'aide de la Loi des Mélanges [8] appliquée aux composites stratifiés :

$$P_c = \rho_c \cdot V_c = \rho_f \cdot V_f + \rho_m \cdot V_m \quad \text{où} \quad V_f + V_m = 1 \quad (I.1)$$

Avec :

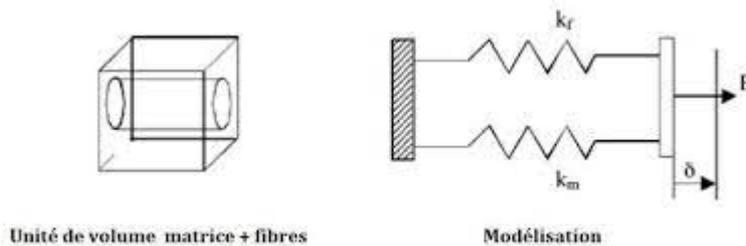
- ✓  $V_f$  = fraction volumique de fibres
- ✓  $V_m$  = fraction volumique de matrice
- ✓  $P_c$  = poids estimé du composite
- ✓  $\rho_f$  = masse volumique de la fibre
- ✓  $\rho_m$  = masse volumique de la matrice

Il s'agit de valeurs théoriques, en réalité la présence de vides fait que  $V_f + V_m \leq 1$ . Par exemple, le module d'élasticité en traction peut être estimé en se basant sur les modules respectifs de la fibre et de la matrice. Cette équation peut être modélisée par un système de ressorts associés en parallèle Figure (I-13).

$$E_{c,t} = E_{f,t} \cdot V_f + E_{m,t} \cdot V_m \dots \dots \dots (I-2)$$

Avec :

- ✓  $E_{c,t}$  = module d'élasticité en traction estimé du composite
- ✓  $E_{f,t}$  = module d'élasticité en traction de la fibre
- ✓  $E_{m,t}$  = module d'élasticité en traction de la matrice
- ✓  $V_f$  = fraction volumique de fibres
- ✓  $V_m$  = fraction volumique de matrice



**Figure (I-13): Modélisation par un système de ressorts des propriétés en traction d'un composite stratifié.**

## Généralité sur les matériaux composites

Dans le cas du module d'élasticité en flexion, le modèle correspond à une association en série des ressorts (Figure 13). L'équation correspondante serait alors (I-3)

$$E_{cf} = \frac{E_{ff} \cdot E_m}{E_{ff} \cdot V_m + E_{mf} \cdot V_f} \dots\dots(I-3)$$

Avec :

- ✓  $E_{c,f}$  = module d'élasticité en flexion estimé du composite
- ✓  $E_{f,f}$  = module d'élasticité en flexion de la fibre
- ✓  $E_{m,f}$  = module d'élasticité en flexion de la matrice
- ✓  $V_f$  = fraction volumique de fibres
- ✓  $V_m$  = fraction volumique de matrice

Ces deux équations permettent de déterminer les bornes supérieure ( $E_{c,t}$ ) et inférieure ( $E_{c,f}$ ) au module d'élasticité du composite, modélisées respectivement par une courbe linéaire et par une hyperbole (Figure I-14). Le module réel du composite se situe alors entre ces deux courbes.

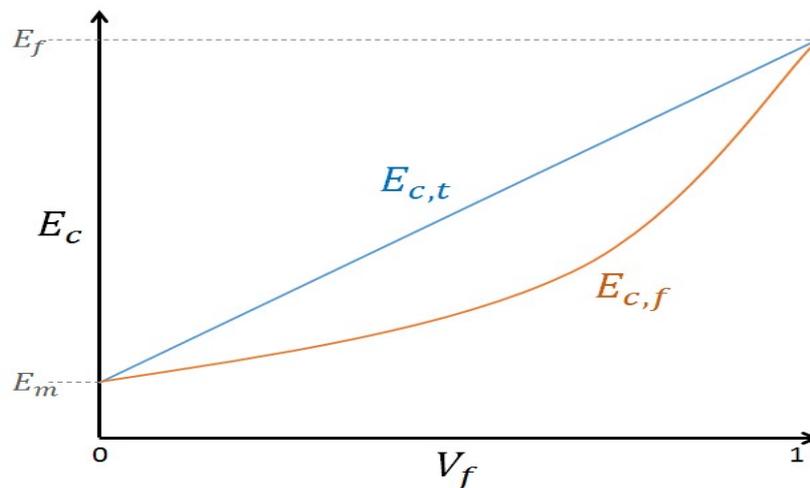


Figure (I-14) : Modélisation des bornes d'après la Loi des Mélanges.

# **Chapitre II**

## **Comportement mécanique des stratifiés en flexion 03 points**

# Comportement mécanique des stratifiés en flexion 03 points

---

## II.1. Introduction

La définition du comportement des matériaux a pour but de comprendre comment ils réagissent à une contrainte spécifique, ce qui permet de modéliser et de dimensionner Relativement précis et fiable pour une structure ou un processus particulier. Aussi, Les composants de nombreux bâtiments modernes sont de plus en plus utiles et doivent Répondre à un nombre croissant de critères dimensionnels. Cela nécessite une compréhension et un aperçu du comportement des matériaux et des lois sur les dommages, ce qui permet de créer des outils de modélisation et de dimensionnement des structures. Les méthodes d'identification du comportement d'un matériau passe souvent par la définition de ses lois de comportement.

Dans ce chapitre, le comportement mécanique des matériaux composites et des stratifiés composites en particulier est révélé. Ensuite, une présentation des différents mécanismes d'endommagement et des techniques de caractérisation des matériaux composites est envisagée.

## II.2. Les caractéristiques du mélange renfort-matrice

On qualifie couramment le nom de pli le demi-produit (renfort + matrice) présenté sous forme quasi bidimensionnelle :

- Un unidirectionnel + matrice ;
- Un tissu (chaîne + trame) + matrice ;
- Un mat + matrice.

### II.2.1. La teneur en masse :

La teneur en masse de renfort est donnée comme suit :

$$M_f = \frac{\text{masse des renforts}}{\text{masse totale}} \quad (\text{II.1})$$

En conséquence, la teneur en masse de matrice et :

$$M_m = \frac{\text{masse de matrice}}{\text{masse totale}} \quad (\text{II.2})$$

On peut donner la teneur en masse de matrice en fonction de la teneur en masse de renfort comme suit :

## Comportement mécanique des stratifiés en flexion 03 points

$$M_m = 1 - M_f \quad (\text{II.3})$$

### II.2.2. La teneur en volume :

L'équation suivante caractérise la teneur en volume de renfort :

$$V_f = \frac{\text{volume des renforts}}{\text{volume totale}} \quad (\text{II.4})$$

Ou par :

$$V_f = \frac{M_f/\rho_f}{M_f/\rho_f + M_m/\rho_m} \quad (\text{II.5})$$

$\rho_f$  : masse volumique de renfort

$\rho_m$  : masse volumique de matrice

En conséquence, la teneur en volume de matrice est donnée comme:

$$V_m = \frac{\text{volume de matrice}}{\text{volume totale}} \quad (\text{II.6})$$

Ou par :

$$V_f = \frac{M_m/\rho_f}{M_f/\rho_f + M_m/\rho_m} \quad (\text{II.7})$$

On peut donner la teneur en volume de la matrice en fonction de la teneur en volume du renfort comme suit :

$$V_m = 1 - V_f \quad (\text{II.8})$$

### II.2.3. Epaisseur du composite stratifié :

On peut exprimer l'épaisseur à partir de la teneur en masse du renfort. L'épaisseur notée (h):

$$h = m_o V \left( \frac{1}{\rho_f} + \frac{1}{\rho_m} + \frac{(1-M_f)}{M_f} \right) \quad (\text{II.9})$$

### II.2.4. Masse volumique :

Pour le mélange « renfort + matrice » la masse volumique  $\rho$  est :

$$\rho = \frac{\text{masse totale}}{\text{volume totale}} \quad (\text{II.10})$$

Ou bien par la formule suivante :

$$\rho = \rho_f V_f + \rho_m V_m \quad (\text{II.11})$$

### II.2.5. Coefficient de poisson :

Il caractérise la contraction dans le sens transverse ( $T$ ) du pli lorsqu'on le sollicite en traction suivant le sens longitudinal ( $L$ )

$$\vartheta LT = \vartheta_f V_f + \vartheta_m V_m$$

$$\vartheta TL = \vartheta LT \frac{E_T}{E_L} \quad (\text{II.12})$$

### II.2.6. Module d'élasticité du composite stratifié :

#### II.2.6.1. Module d'élasticité longitudinal :

On peut estimer le module d'élasticité en traction à la base des modules d'élasticité de la fibre et de la matrice.

$$E_L = E_f V_f + E_m V_m \quad (\text{II.13})$$

$E_f$  : Module d'élasticité de fibre

$E_m$  : Module d'élasticité de matrice

#### II.2.6.2. Module d'élasticité transversal :

La relation du module d'élasticité en flexion serait comme suit :

$$E_T = \frac{E_f E_m}{E_f V_m + E_m V_f} \quad (\text{II.14})$$

## Comportement mécanique des stratifiés en flexion 03 points

### II.2.7. Module de cisaillement :

Le module de cisaillement est un paramètre physique spécifique au matériau qui est utilisé pour caractériser les déformations générées par les efforts de cisaillement. Pour les fibres :

$$G_f = \frac{E_f}{2(1 + 2V_f)} \quad (\text{II.15})$$

Pour les matrices :

$$G_m = \frac{E_m}{2(1 + 2V_m)} \quad (\text{II.16})$$

### II.2.8. Module de glissement :

Un ordre de grandeur de ce module difficile à approcher par le calcul est donné par l'expression suivante :

$$G_{LT} = \left( \frac{1}{(1 - V_f) + \frac{G_m V_f}{G_f}} \right) \quad (\text{II.17})$$

### II.2.9. Module de compressibilité :

L'équation suivante décrit le module de compressibilité de la fibre :

$$k_f = \frac{E_f}{2(1 - 2V_f)} \quad (\text{II.18})$$

Le module de compressibilité de la matrice est :

$$k_m = \frac{E_m}{2(1 - 2V_m)} \quad (\text{II.19})$$

### II.2.10. Module de la compression latéral :

Le module de la compression latéral de fibre vient sous la forme de l'équation suivante :

$$K_f = k_f + \frac{G_f}{3} \quad (\text{II.20})$$

Pour la matrice c'est :

$$K_m = k_m + \frac{G_m}{3} \quad (\text{II.21})$$

### II.2.11. Résistance à la rupture d'un composite stratifié :

Lorsque les fibres se rompent avant la matrice, on obtient pour le mélange et pour une sollicitation dans la direction ( $L$ ) :

$$\sigma_{L\text{ rup}} = \sigma_{f\text{ rup}}V_f + \sigma_{m\text{ rup}}V_m \quad (\text{II.22})$$

$$\sigma_{L\text{ rup}} = \sigma_{f\text{ rup}}(V_f + (1 - V_f)\frac{E_m}{E_f}) \quad (\text{II.23})$$

### II.3. Mécanisme d'endommagement

#### II.3.1. Introduction :

L'endommagement se présente sous forme de discontinuités surfacique pour les microfissures ou volumiques pour les cavités. Il se présente sous forme de mouvement et accumulation des dislocations dans les métaux, et de modification des liaisons intermoléculaires dans les matériaux organiques. L'endommagement a un caractère irréversible. Lorsque les matériaux composites subissent des contraintes externes, différents types de dégradation résultent, l'endommagement de la matrice, des fibres et de l'interface fibre-matrice. Ces mécanismes se produisent simultanément, réduisant ainsi les propriétés mécaniques du matériau composite. L'endommagement se développe suivant la nature des matériaux et des conditions de sollicitation mécanique imposées.

#### II.3.2. Les divers mécanismes de rupture dans un composite unidirectionnel :

La rupture finale d'un composite unidirectionnel est le résultat de l'accumulation de divers mécanismes élémentaires :

- La rupture des fibres
- La rupture transverse de la matrice
- La rupture longitudinale de la matrice
- La rupture de l'interface fibre-matrice

Généralement, un mécanisme n'est pas isolé, mais divers mécanismes coexistent. Ces mécanismes se développent suivant la nature des matériaux et les conditions de sollicitations mécaniques imposées.

#### II.3.3. Microfissuration matricielle :

Dans la matrice, la fissuration peut être transverse ou longitudinale. La première se produit lorsque la contrainte en traction dans la matrice atteint la contrainte à la rupture de la matrice,

## Comportement mécanique des stratifiés en flexion 03 points

alors que la seconde a lieu lorsque la contrainte de cisaillement dans la matrice atteint la contrainte à la rupture en cisaillement. Ce dernier mode de rupture appelé « splitting » se produit lorsque la contrainte de décohésion est supérieure à la contrainte de cisaillement à la rupture de la matrice. Dans le cas de composites industriels à fibres de verre, les performances à la rupture peuvent être limitées par une déformabilité trop faible de la matrice. Il apparaît donc nécessaire d'adapter au mieux les propriétés de la matrice à celles des fibres pour optimiser les performances à la rupture des matériaux composites.

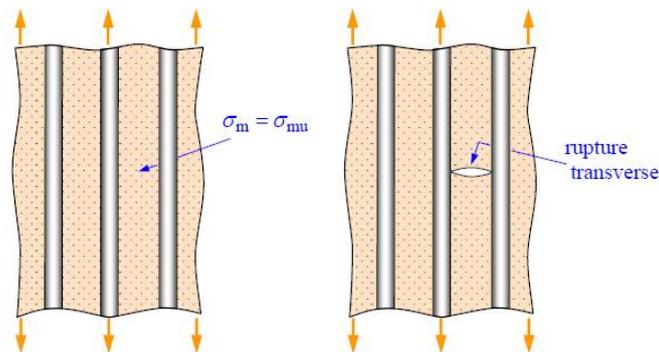


Figure (II-1) : Rupture transverse de la matrice [1]

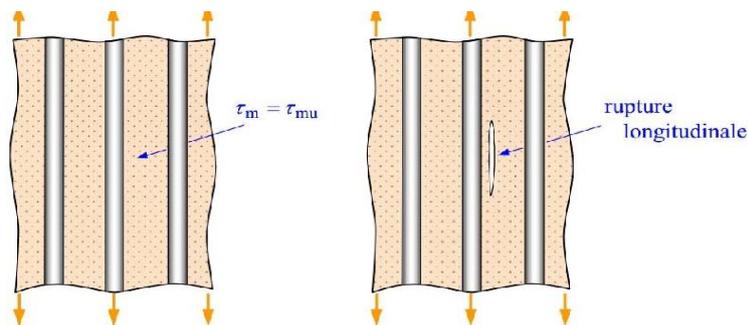


Figure (II-2) : Rupture longitudinal de la matrice [1]

### II.3.4. Décohésion fibre matrice :

Dans la pratique, même après avoir choisi les constituantes fibres et matrice avec soin en les soumettant à des contrôles précis, l'interface issue de leur interaction ne peut être totalement maîtrisée par les efforts d'analyse et de prévision. Dans le cas particulier où les fibres sont discontinues, la zone interfaciale est le siège d'initiation de fissures et devient de ce fait critique à l'accumulation de l'endommagement. Cela est dû essentiellement à l'efficacité du transfert de charges à l'interface fibre-matrice ainsi qu'à la concentration des contraintes aux extrémités des fibres. Le comportement de l'interface fibre-matrice dépend essentiellement de

## Comportement mécanique des stratifiés en flexion 03 points

ses propriétés mécaniques comparées à celles des fibres et de la matrice. Généralement la décohésion a lieu dans deux cas :

- Lorsque la cohésion est inférieure à la contrainte de cisaillement à la rupture de la matrice.
- Lorsque l'adhérence fibre-matrice est faible : dans ce cas, la rupture de la matrice traverse les fibres sans qu'il y ait rupture de fibres, mais avec décohésion de l'interface fibre-matrice.

Dans le cas d'une adhérence fibre-matrice élevée, la rupture initiée, par rupture de fibres, ou par rupture de matrice, induit en front de fissure des concentrations de contraintes conduisant à une propagation de la rupture successivement dans les fibres et dans la matrice.

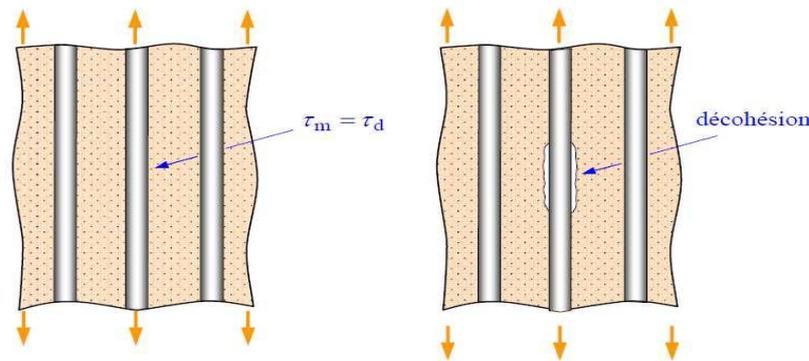


Figure (II-3) : Décohésion fibre-matrice [1]

### II.3.5. Rupture de fibre :

Dans certains cas, l'endommagement dans les composites est initié par une rupture de fibre. Cela se produit en général lorsque l'orientation des fibres coïncide plus ou moins avec l'axe de sollicitation du matériau composite. La rupture a lieu lorsque la contrainte de rupture de la fibre est atteinte. L'endommagement produit ne cesse de progresser à mesure que la contrainte est appliquée, et provoque ainsi la rupture de la matrice et autres fibres jusqu'à la rupture totale du matériau.

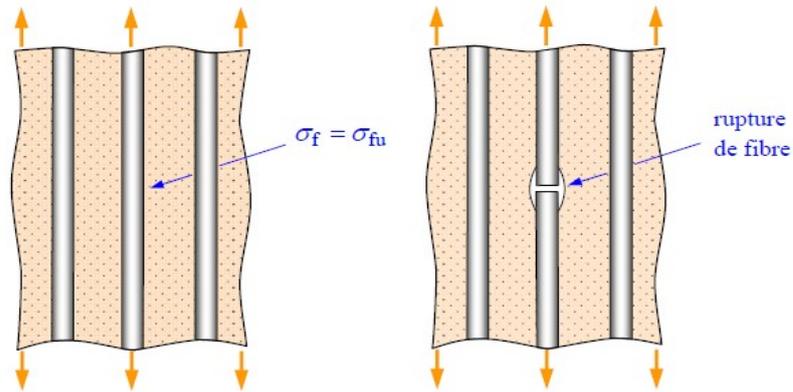


Figure (II-4) : Rupture fibre [1]

### II.3.6. Délaminage :

Dans le cas d'un stratifié ou multicouche, aux mécanismes élémentaires précédemment décrits s'ajoute un mécanisme de rupture entre couches appelé rupture par délaminage. Ce type d'endommagement dépend de la nature des constituants, de l'architecture des couches et du mode de sollicitation mécanique imposé. Le délaminage, qui apparaît après la phase d'endommagement intra laminaire, commence souvent sur les bords avant de s'étendre sur toute l'éprouvette. Il correspond à une fissuration qui a tendance à séparer les plis ou couche du composite.

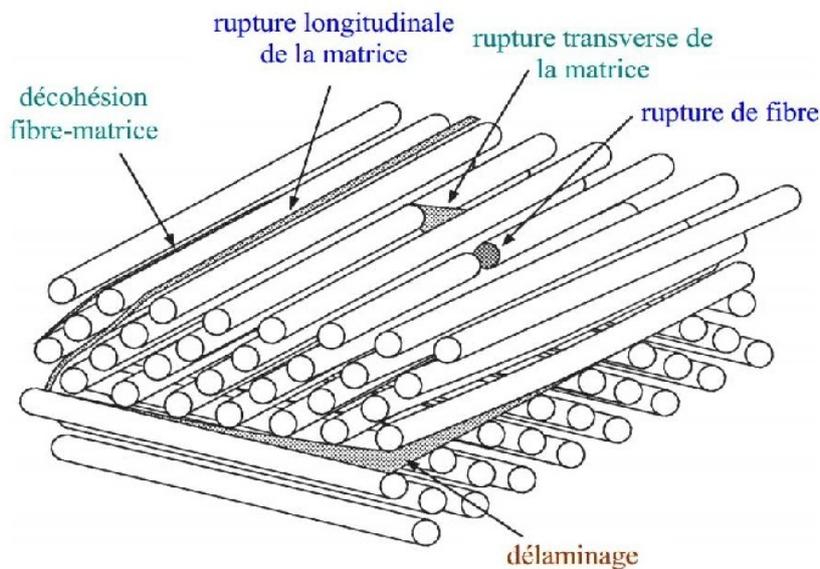


Figure (II-5) : Mécanisme d'endommagement observés dans les stratifiés [1]

### II.3.7. Moyens d'identification de l'endommagement

Les méthodes d'investigation et/ou de mesure de l'endommagement sont nombreuses et sont classés en deux catégories : les méthodes directes et les méthodes indirectes.

#### 1. Méthode directe :

Ces méthodes permettent d'observer directement l'endommagement afin de pouvoir faire une description quantitative. On distingue essentiellement :

- Microscope optique,
- Microscope à balayage (MEB),
- Microscope électronique en transmission (MET),
- Diffusion des rayons X,
- Analyse d'images.

#### 2. Méthode indirecte :

Ces méthodes se caractérisent par la mesure d'un paramètre physique qui évolue au cours de l'endommagement on dénote :

- Mesure de l'évolution d'un paramètre élastique,
- Emission acoustique,
- Technique ultrasonore,
- Vibrations,
- Thermographie.

### II.4. Théorie des poutres stratifiées sollicitées en flexion 3 points :

#### II.4.1. Introduction:

Le type d'essais le plus employé pour déterminer les caractéristiques mécaniques et le comportement des matériaux composites est en fait la flexion. Ce choix correspond souvent aux sollicitations auxquelles sont soumises les pièces réelles, mais surtout offre l'avantage de diminuer considérablement les difficultés de réalisation de l'essai par l'utilisation d'éprouvettes simples sans avoir la difficulté du collage des étalons ni le problème rencontré lors du serrage des mors dans le cas des essais de traction (sur contraintes locales conduisant à des ruptures prématurées de l'éprouvette). De plus, selon que l'opérateur travaillera en flexion 3 points ou 4 points et, suivant la distance entre appuis, il pourra privilégier un mode de rupture en traction-compression ou en cisaillement [10].

## II.4.2. Principe d'essai de flexion :

L'essai de flexion est un test mécanique qui fait partie de la famille des essais indépendants du temps comme le choc et la dureté [7]. Il consiste à placer une barre rectangulaire sur deux appuis et d'appliquer un effort ponctuel au centre [11], comme illustré à la figure (II-6)

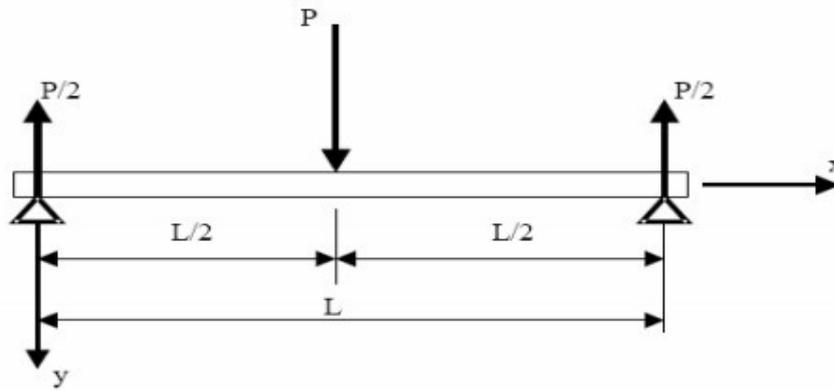


Figure (II-6) : Flexion 3 points

### II.4.2.1. Mécanisme de rupture:

Dans cet essai standard, trois formes d'endommagement peuvent se produire, mais seules deux sont autorisées : l'endommagement par traction et l'endommagement par compression.

Ils sont liés à l'effet de flexion et permettent donc de déterminer la contrainte maximale. Si un endommagement par cisaillement est découvert, cette quantification n'est plus réalisable et les hypothèses de l'essai sont jugées insatisfaisantes.

La rupture se produit à la suite de la formation et de la propagation de fractures, qui sont souvent situées sur la fibre extérieure la plus sollicitée en extension (Figure II-7). Lorsqu'une contrainte locale est égale à la force de cohésion du matériau, les connexions interatomiques à cet endroit se brisent [2].

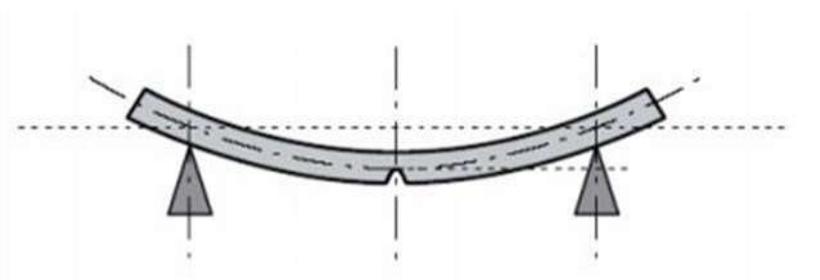


Figure (II-7) : Localisation de la rupture

## II.4.2.2. Machines de flexion :

La plupart des machines de flexion sont aujourd'hui dites universelles (traction, flexion, compression, fluage...), voir figure (II-8).

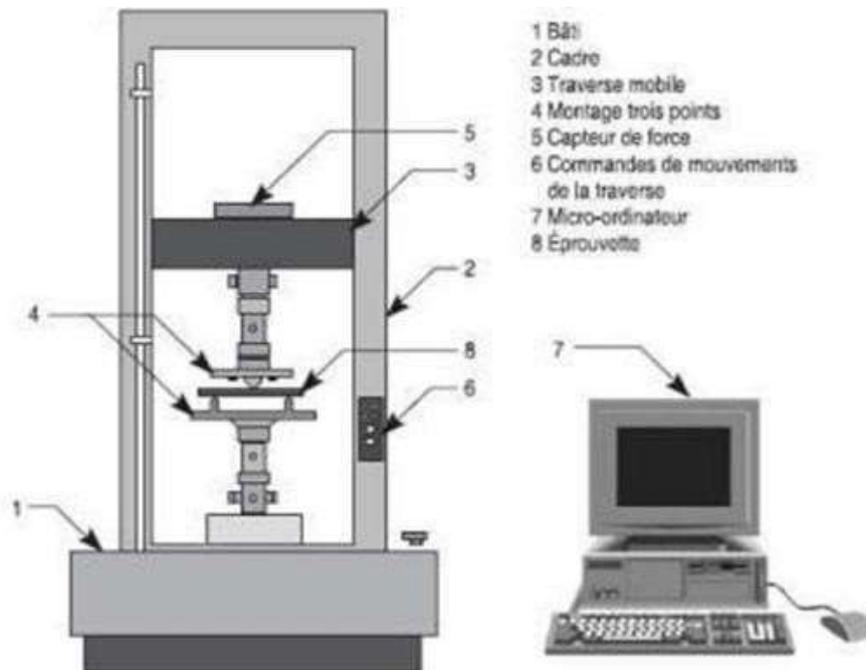
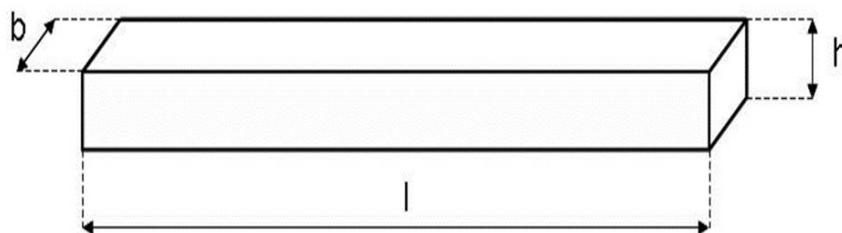


Figure (II-8) : Machine universelle en montage de flexion

## II.4.2.3. Éprouvette de flexion :

Les éprouvettes de l'essai de flexion sont aux normes définies dans la figure(II-9)



Figure(II-9) : Dimensions des éprouvettes de flexion

## II.4.3. Expression des résultantes et des moments :

### II.4.3.1. Résultantes en membrane :

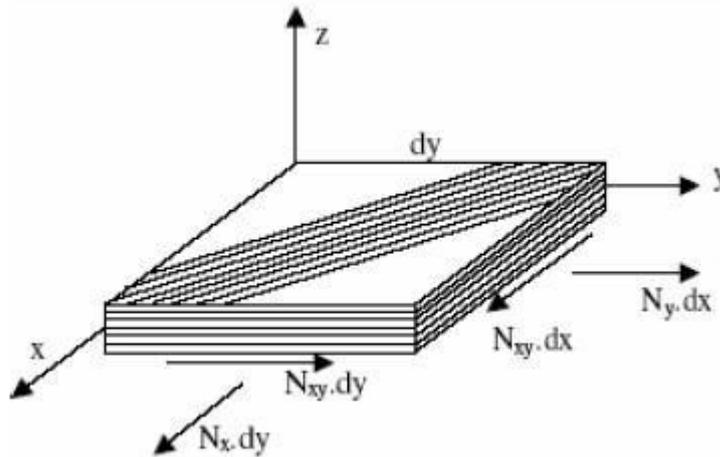
Le champ des résultantes en membrane, noté  $N(x, y)$  est défini par :

$$[N_{(x,y)}] \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} [\sigma_k(M)] dz \quad (II.24)$$

Où  $\sigma_k(M)$  est la matrice des contraintes en membrane dans la couche k soit :

$$[N_{(x,y)}] = \begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{bmatrix} = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix} dz \quad (II.25)$$

$N_x, N_y, N_{xy}$  sont respectivement les résultantes, par unité de longueur, des contraintes normales suivant les axes x et y et des contraintes de cisaillements, dans le plan (x, y). Elles sont schématisées symboliquement sur la figure (II.10) :



**Figure (II-10): Schématisation des résultantes en membrane des actions exercées sur un élément de stratifié**

La discontinuité des contraintes en passant d'une couche à l'autre conduit à réécrire la relation (II.26) sous la forme :

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{bmatrix} = \sum_{k=1}^n \int_{h_{k-1}}^{h_k} \begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix} dz \quad (II.26)$$

$$\left. \begin{aligned}
 N_{(x,y)} &= \sum_{k=1}^n [Q'_k \varepsilon_{m(x,y)} + z Q'_k k_{(x,y)}] dz \\
 N_{(x,y)} &= \sum_{k=1}^n \int_{h_{k-1}}^{h_k} [Q'_k \varepsilon_{m(x,y)} \int_{h_{k-1}}^{h_k} dz] + \sum_{k=1}^n [Q'_k k_{(x,y)} \int_{h_{k-1}}^{h_k} dz] \\
 N_{(x,y)} &= [\sum_{k=1}^n (h_k - h_{k-1}) Q'_k] \varepsilon_{m(x,y)} + \left[ \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n (h_k^2 - h_{k-1}^2) \right]
 \end{aligned} \right\} \quad (II.27)$$

Soit en définitive :

$$N_{(x,y)} = A \varepsilon_{m(x,y)} + B k_{(x,y)} \quad (II.28)$$

En introduisant les matrices :

$$\left. \begin{aligned}
 A &= \sum_{k=1}^n (h_k - h_{k-1}) Q'_k \\
 A &= [A_{ij}] \\
 \text{avec } A_{ij} &= \sum_{k=1}^n (h_k - h_{k-1}) Q'_{kj}
 \end{aligned} \right\} \quad (II.29)$$

$$\left. \begin{aligned}
 B &= \sum_{k=1}^n \frac{1}{2} (h_k^2 - h_{k-1}^2) Q'_k \\
 B &= [B_{ij}] \\
 \text{avec } B_{ij} &= \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n (h_k^2 - h_{k-1}^2) Q'_{ijk}
 \end{aligned} \right\} \quad (II.30)$$

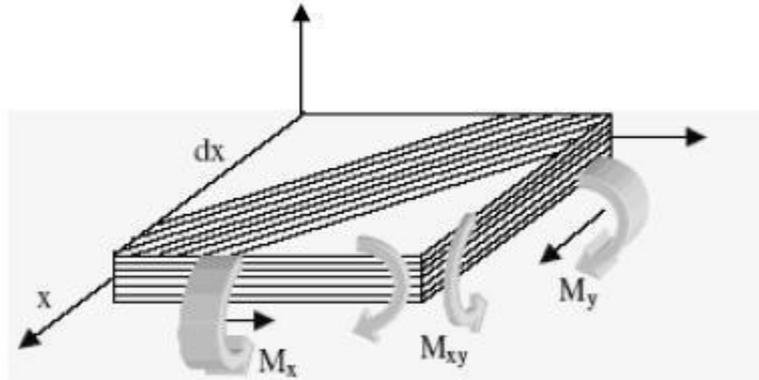
Ces équations montrent que dans le cas d'un stratifié, les résultantes en membrane ne sont pas seulement fonctions des déformations en membrane comme dans le cas de plaques homogènes, mais sont également fonction des courbures en flexion et en torsion.

#### II.4.3.2. Moments de flexion et de torsion :

Les relations fondamentales des stratifiés font intervenir les moments résultants des contraintes exercées sur un élément du stratifié. Les moments de flexion et de torsion sont définis par :

$$[M_{(x,y)}] = \begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \sum_{k=1}^n \int_{h_{k-1}}^{h_k} Z \begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix} dz \quad (II.31)$$

$M_x$  Et  $M_y$  sont les moments de flexion et  $M_{xy}$  le moment de torsion. Ils sont schématisés à la figure (II-11)



**Figure (II-11) : Schématisation des moments de flexion et de torsion**

Le champ des moments s'explique comme suite :

$$M_f(x,y) = \sum_{k=1}^n \int_{h_{k-1}}^{h_k} [Q'_k \varepsilon_m(x,y) + z^2 Q'_k k(x,y)] dz \quad (II.32)$$

$$M_f(x,y) = \left[ \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n (h_k^2 - h_{k-1}^2) Q'_k \right] \varepsilon_m(x,y) + \left[ \frac{1}{3} \sum_{k=1}^n (h_k^3 - h_{k-1}^3) Q'_k \right] k(x,y)$$

Soit :

$$M_f(x,y) = B \varepsilon_m(x,y) + D k(x,y) \quad (II.33)$$

En introduisant les matrices :

$$D = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^n (h_k^3 - h_{k-1}^3) D'_k$$

$$\text{avec } [D_{ij}] = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^n (h_k^3 - h_{k-1}^3) Q'_{ij k} \quad (i, j) = (x, y) \quad (II.34)$$

Les moments de flexion et de torsion sont donc fonctions des courbures en flexion et en torsion, mais sont également fonction des déformations en membrane.

#### **II.4.4. Equation constitutive:**

L'équation constitutive d'une plaque stratifiée exprime les résultantes et moments en fonctions des déformations en membrane et des courbures.

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \\ M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} & B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} & B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} & B_{16} & B_{26} & B_{66} \\ B_{11} & B_{12} & B_{16} & D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} & D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} & D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \\ K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{bmatrix} \quad (\text{II.35.a})$$

Ou sous la forme contractée :

$$\begin{bmatrix} N \\ M_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A - B \\ B - D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_m \\ k \end{bmatrix} \quad (\text{II.35.b})$$

Les termes des matrices introduites donnés par les expressions (II.29), (II.30) et (II.34) sont également exprimés en introduisant l'épaisseur  $k$  et la cote  $z_k$  au centre de la couche  $k$ , sous la forme :

$$\left. \begin{aligned} A_{ij} &= \sum_{k=1}^n Q'_{ij_k} e_k \\ B_{ij} &= \sum_{k=1}^n Q'_{ij_k} e_k z_k \\ D_{ij} &= \sum_{k=1}^n Q'_{ij_k} \left( e_k z_k^2 + \frac{e_k^3}{12} \right) \end{aligned} \right\} \quad (\text{II.36})$$

#### II.4.5. Matrice de rigidité :

La matrice intervenant dans l'expression (II.34) est la matrice de rigidité du stratifié décrivant le comportement élastique macroscopique du stratifié au point  $M_0(x,y)$ . La matrice  $A$  est la matrice de rigidité en membrane,  $D$  est la matrice de rigidité de flexion et  $B$  la matrice de couplage membrane-flexion-torsion. Ce couplage existe même si les matériaux des couches sont isotropes. Il résulte de la structure en couches de matériaux de caractéristiques mécaniques différentes.

Le couplage est nul ( $B=0$ ) seulement dans le cas où le stratifié est symétrique.

La symétrie implique une symétrie de propriétés des couches, de leurs côtes et de leurs Orientations.

Divers couplages sont observés et mis en évidence. Le couplage torsion cisaillement provient des termes  $A_{16}$  et  $A_{26}$ . Le couplage membrane-flexion résulte des termes  $B_{11}$ ,  $B_{12}$  et  $B_{13}$  alors que le couplage membrane-torsion résulte des termes  $B_{13}$  et  $B_{26}$ . Enfin, le couplage flexion torsion résulte de coefficient  $D_{16}$  et  $D_{26}$ .

### II.4.6. théorie classique des stratifiés :

#### II.4.6.1. Expressions générales :

Dans le cas d'une flexion pure d'un stratifié symétrique, l'équation constitutive (II.35.a) se réduit à :

$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & 0 \\ D_{21} & D_{22} & 0 \\ 0 & 0 & D_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{bmatrix} \quad (\text{II.37})$$

Où  $K_x, K_y$  et  $K_{xy}$  sont définis dans les relations :

$$K_x = \frac{\partial^2 w_0}{\partial^2 x} K_y = \frac{\partial^2 w_0}{\partial^2 y} K_{xy} \quad (\text{II.38})$$

L'équation (II.37) s'écrit sous la forme inverse suivante :

$$\begin{bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D^*_{11} & D^*_{12} & 0 \\ D^*_{21} & D^*_{22} & 0 \\ 0 & 0 & D^*_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} \quad (\text{II.39})$$

Où  $D^*_{ij}$  sont les éléments de la matrice inverse de  $[D_{ij}]$

La théorie des poutres fait l'hypothèse que, dans le cas d'une flexion suivant l'axe x, les moments  $M_x$  et  $M_{xy}$  sont nuls :

$$M_x = M_{xy} = 0 \quad (\text{II.40})$$

Les relations (II-38) et (II-39) conduisent donc à :

$$K_x = \frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} = D^*_{11} M_x \quad (\text{II.41})$$

Enfin, la théorie des poutres fait l'hypothèse supplémentaire que la flèche n'est fonction que de x :

$$w_0 = w_0(x) \quad (\text{II.42})$$

La plus grande attention doit toutefois être apportée à cette dernière hypothèse. En effet, les équations (II.38) et (II.39) montrent que les courbures  $k_x$  et  $k_{xy}$  sont fonctions du moment de flexion  $M_x$  soit :

## Comportement mécanique des stratifiés en flexion 03 points

$$\left. \begin{aligned} k_y &= \frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2} = D^*_{12} M_x \\ k_{xy} &= -2 \frac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial y} = D^*_{12} M_x \end{aligned} \right\} \quad (\text{II.43})$$

Ces relations montrent que la flèche  $w$  dépend a priori de la variable  $y$ .

Cet effet est particulièrement important dans le cas d'éprouvettes de flexion de laboratoire, de forme plus proche d'une lame que d'une poutre. Il en résulte que la flexion et la torsion induite par les termes  $D^*_{12}$  et  $D^*_{16}$  dans les équations (II.43) tendent à produire un décollement partiel de la poutre sur ses supports.

Cet effet est toutefois négligeable dans le cas où le rapport de la longueur à la largeur ( $L/b$ ) est suffisamment élevé.

Il est usuel d'écrire cette équation sous la forme :

$$\frac{D^2 \omega_0}{dx^2} = - \frac{M}{E_{xi}} \quad (\text{II.44})$$

En introduisant :

- Le module de flexion  $E_{xi}$  de la poutre :

$$E_x = \frac{12}{h^3 D^*_{11}} \quad (\text{II.45})$$

- Le moment quadratique  $I$  de la section droite de la poutre par rapport au plan  $(x, y)$  :

$$I = I_{xy} = \frac{bh^3}{12} \quad (\text{II.46})$$

- Le moment  $M$  de flexion :

$$M = bM_x \quad (\text{II.47})$$

L'équation de flexion des plaques se réduit ici à :

$$\frac{d^2 M_x}{dx^2} + q = 0 \quad (\text{II.48})$$

## Comportement mécanique des stratifiés en flexion 03 points

En tenant compte de (II-44), cette équation s'écrit :

$$\left. \begin{aligned} \frac{d^4 \omega_0}{dx^4} &= D^* \\ \frac{d^4 \omega_0}{dx^4} &= \frac{P}{E_x I} \\ \text{avec } P &= b \cdot q \end{aligned} \right\} \quad (\text{II.49})$$

L'équation différentielle (II-49) en  $w$  a la même forme que l'équation différentielle  $\frac{d^4 \omega_0}{dx^4} = \frac{A}{B} q$  obtenue dans le cas de la flexion cylindrique. Les deux équations diffèrent par les coefficients introduits :  $D^*$  dans la flexion de poutre et  $\frac{1}{D_{11}}$  (stratifié symétrique) dans le cas de la flexion cylindrique.

Dans le problème statique, les déplacements sont indépendants du temps. On a alors :

$$\left. \begin{aligned} \frac{dM_x}{dx} &= Q_x \\ \frac{dM}{dx} &= Q \end{aligned} \right\} \quad (\text{II.50})$$

En posent :

$$Q = bQ_x \quad (\text{II.51})$$

Les contraintes dans la couche  $k$  du stratifié s'écrivent :

$$\begin{bmatrix} \sigma_x^k \\ \sigma_y^k \\ \sigma_{xy}^k \end{bmatrix} = z \begin{bmatrix} Q_{11}^k & Q_{12}^k & Q_{16}^k \\ Q_{12}^k & Q_{22}^k & Q_{26}^k \\ Q_{16}^k & Q_{26}^k & Q_{66}^k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{bmatrix} \quad (\text{II.52})$$

En notant, pour simplifier,  $Q_{ij}^k$  les coefficients de rigidité  $Q'_{ij}$  de la couche  $k$  rapportés aux axes de la plaque, d'où :

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{xx}^k &= z(Q_{11}^k D^*_{11} + Q_{12}^k D^*_{12} + Q_{16}^k D^*_{16}) M_x \\ \sigma_{yy}^k &= z(Q_{12}^k D^*_{11} + Q_{22}^k D^*_{12} + Q_{26}^k D^*_{16}) M_x \\ \sigma_{xy}^k &= z(Q_{16}^k D^*_{11} + Q_{26}^k D^*_{12} + Q_{66}^k D^*_{16}) M_x \end{aligned} \right\} \quad (\text{II.53})$$

## Comportement mécanique des stratifiés en flexion 03 points

Les expressions de ces contraintes sont réécrites en introduisant M et I sous la forme :

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x^k &= z a_x^k \frac{M}{I} \\ \sigma_y^k &= z a_y^k \frac{M}{I} \\ \sigma_{xy}^k &= z a_{xy}^k \frac{M}{I} \end{aligned} \right\} \quad (\text{II.54})$$

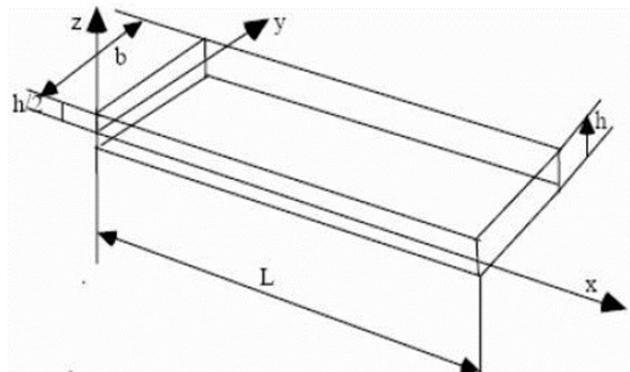
Avec:

$$\left. \begin{aligned} a_{xx}^k &= \left( Q_{11}^k D_{11}^* + Q_{12}^k D_{12}^* + Q_{16}^k D_{16}^* \right) \frac{h^3}{12} \\ a_{xy}^k &= \left( Q_{12}^k D_{11}^* + Q_{22}^k D_{12}^* + Q_{26}^k D_{16}^* \right) \frac{h^3}{12} \\ a_{xx}^k &= \left( Q_{16}^k D_{11}^* + Q_{26}^k D_{12}^* + Q_{66}^k D_{16}^* \right) \frac{h^3}{12} \end{aligned} \right\} \quad (\text{II.55})$$

Les expressions précédentes des contraintes ne sont correctes qu'à une distance assez éloignée (h) des bords de la poutre. Les résultats précédents ne sont donc pas applicables qu'au cas des poutres ayant un rapport b/h assez élevé. D'autre part, dans le cas de poutres en matériaux homogènes, les relations (II.55) deviennent :  $a_{xx} = 1$  et  $a_{xy} = 0$

### II.4.7. Application à la flexion 3 points :

Considérons une poutre en flexion 3 points, la symétrie du problème conduit à ne considérer qu'une moitié de poutre, comme illustré à la figure (II-12) :



**Figure (II-12) : Élément poutre**

Le moment de flexion s'exprime par la relation :

$$M = -\frac{P_x}{2} \quad 0 \leq x \leq \frac{L}{2} \quad (\text{II.56})$$

## Comportement mécanique des stratifiés en flexion 03 points

Où P est la charge totale exercée au milieu de la poutre.

En rapportant cette expression dans (II.44), il vient :

$$\frac{d^2\omega_0}{dx} = -\frac{Px}{2E_xI} \quad 0 \leq x \leq \frac{L}{2} \quad (\text{II.57})$$

Dans le cas d'appuis simples, les conditions aux frontières sont, pour  $x = 0$  :

$$M = \omega_x \quad (\text{II.58})$$

D'autre part, la symétrie impose, pour  $x=L/2$

$$\frac{d\omega_0}{dx} = 0 \quad (\text{II.59})$$

L'intégration de (II.57) associée à (II.58) et (II.59) conduit à :

$$\omega_0 = \frac{PL^3}{48E_xI} x \left[ 3 - \left( \frac{2x}{L} \right)^2 \right] \quad (\text{II.60})$$

La flèche  $\omega_c$  au centre de la poutre ( $x=L/2$ ) s'écrit :

$$\omega_c = \frac{PL^3}{48E_xI} = \frac{PL^3}{4bh^3\omega_0} \quad (\text{II.61})$$

Cette relation est utilisée pour déterminer soit le module de flexion de la poutre, soit le coefficient  $D^*_{11}$ , connaissant la flèche au centre  $\omega_c$  pour la charge P :

$$\left. \begin{aligned} E_x &= \frac{PL^3}{48\omega_c I} = \frac{PL^3}{4bh^3\omega_c} \\ D^*_{11} &= \frac{48b\omega_c I}{PL^3} \end{aligned} \right\} \quad (\text{II.62})$$

Les contraintes de la couche k s'écrivent d'après (II.54)

## Comportement mécanique des stratifiés en flexion 03 points

---

$$\left. \begin{aligned} \sigma^k_{xx} &= -6a^k_{xx} \frac{P}{bh^3} xZ \\ \sigma^k_{yy} &= -6a^k_{yy} \frac{P}{bh^3} xZ \\ \sigma^k_{xy} &= -6a^k_{xy} \frac{P}{bh^3} xZ \end{aligned} \right\} \quad (\text{II.63})$$

Ces contraintes sont maximales pour  $x=L/2$ , soit :

$$\left. \begin{aligned} \sigma^k_{xx} &= -3a^k_{xx} \frac{P}{bh^3} Z \\ \sigma^k_{yy} &= -3a^k_{yy} \frac{P}{bh^3} Z \\ \sigma^k_{xy} &= -3a^k_{xy} \frac{P}{bh^3} Z \end{aligned} \right\} \quad (\text{II.64})$$

La contrainte de traction maximale est atteinte sur la face inférieure ( $z=-h/2$ ) et s'exprime suivant :

$$\sigma_{xx \max} = \sigma_0 = \frac{3P}{2bh^3} \quad (\text{II.65})$$

# **Chapitre III**

## **Etude expérimentale**

### III.1. Mise en œuvre des éprouvettes

La mise en œuvre des stratifiés étudiés est réalisée par moulage au contact et sont constitués d'une matrice (Epoxy) associée à la poudre de fer pure comme charge et de mat de fibres de verre comme renfort. Trois types de stratifiés composés de quatre plis époxy/poudre de fer pure/ mat de verre, différenciés par le taux massique de poudre de fer pur (10%, 15% et 25%), ont été envisagés. Le procédé de moulage au contact ou stratification au contact de mise en forme de plastiques renforcés utilisé est entièrement manuel. Il est réalisé à température ambiante et sans pression. Ce procédé est le premier à avoir été employé pour le moulage des résines polyesters insaturés renforcées.

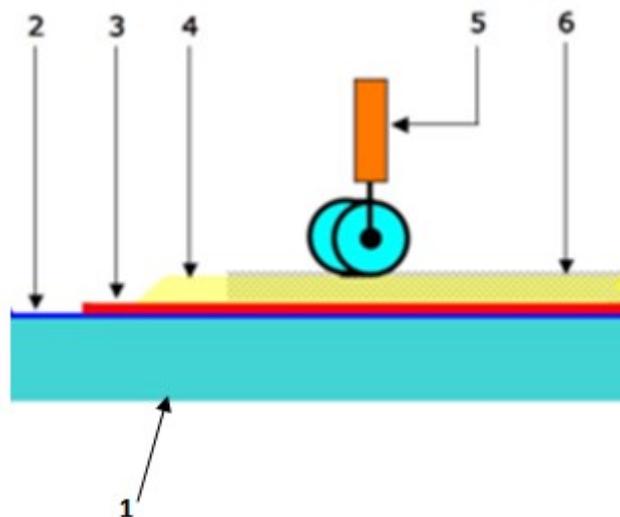


Figure (III-1) : Schéma simplifié du procédé de moulage au contact

- 1) moule
- 2) agent de démoulage
- 3) gelcoat
- 4) résine avec fibre
- 5) rouleau ébulleur
- 6) matériau composite

## Etude expérimental

L'élaboration des stratifiés est effectuée en plusieurs étapes :

- 1) nettoyage, cirage (enduction avec un agent de démoulage) et lustrage du moule pour assurer le démoulage ultérieur et obtenir un effet de glaçage parfait de la surface finale;
- 2) Un gelcoat assez visqueux est déposé pour adhérer avec la stratification ;
- 3) Des couches de renforts (sous forme de mats de 25 à 45 % en poids) et de *résine* liquide catalysée associée à la poudre de fer pur sont déposées successivement sur le moule ;
- 4) Chaque couche est déposée manuellement, puis imprégnée de résine, à l'aide d'un rouleau, jusqu'à obtention de l'épaisseur finale désirée. L'élimination des inclusions d'air ((rouleau « ébulleur ») est une étape essentielle. Pour cette technique de moulage, la seule pression exercée est celle faite par l'opérateur ;
- 5) Après durcissement par polymérisation de la résine, la pièce est démoulée.

Dans une formulation, la charge de poudre de fer pur est une substance solide, non miscible et dispersée par un moyen mécanique dans une matrice. Elle est introduite dans le mélange notamment pour améliorer certaines propriétés et modifier la densité.

La découpe des éprouvettes est réalisée à partir des plaques obtenues (300x300x4) selon la norme ISO 14125.

Les caractéristiques principales des constituants de ces stratifiés sont données sur les tableaux (III.1),(III.2) et (III.3)

Tableau (III.1): caractéristiques principales de la résine

Module d'Young [GPa]	Résistance a la traction [GPa]	Résistance a la flexion [GPa]	Masse volumique [kg/m <sup>3</sup> ]
2.8	74	115	1220

Tableau (III.2) : caractéristiques principales de la fibre de verre

Module d'élasticité longitudinal [GPa]	Module de cisaillement [GPa]	Coefficient de poisson	Contrainte de rupture en traction sur mèche [MPa]	Allongement a la rupture [%]	Masse surfacique [g/m <sup>2</sup> ]	Masse Volumique [kg/m <sup>3</sup> ]
73	30	0.22	2500	4.8	300	2540

# Etude expérimental

Tableau (III.3) : caractéristiques de la poudre de fer pur

Désignation	C	Si	Mn	P	S	Fe
Fer pur	0.0126	0.13	0.30	0.0076	0.0106	98.8

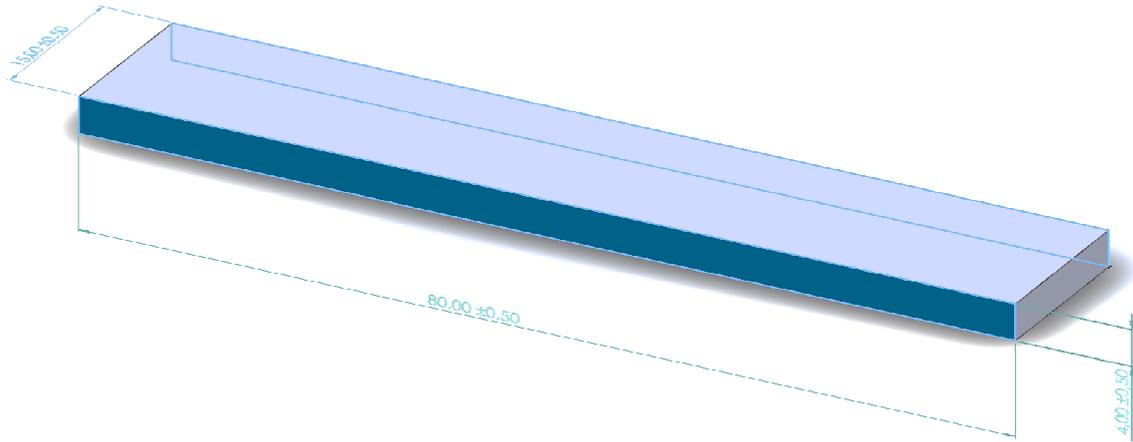
## III.2. Essai de flexion 3 points

### III.2.1. Banc d'essais :



**Figure (III-2): Machine d'essais Zwick/Roell Z020 [20KN]**

Les essais de flexion sont effectués sur une machine d'essais Zwick/Roell Z020 [20KN], dotée d'un capteur de force et pilotée par ordinateur. Cinq essais au moins sont réalisés pour chaque type de stratifié, avec une vitesse d'essai de 10 mm/min à une température ambiante de 20°C. La cellule de charge (dynamomètre) est reliée à une chaîne d'acquisition qui permet l'enregistrement simultané du temps, du déplacement, de la charge et la déformation. Les informations sont stockées et traitées par ordinateur à l'aide du logiciel TestXpert V9.01. et pour cette expérience nous avons utilisé des éprouvettes de dimensions  $L = 80$  mm,  $b = 15$  mm,  $h = 4$  mm, selon la norme ISO 14125



**Figure (III-3): Géométrie des éprouvettes**

La mise en place des éprouvettes est présente sur Figure (III-4)



**Figure (III-4): La mise en place des éprouvettes**

### III.2.2. Résultats expérimentaux des essais statiques de flexion trois points :

1. STRATIFIE A 10% DE CHARGE POUVRE DE FER PURE

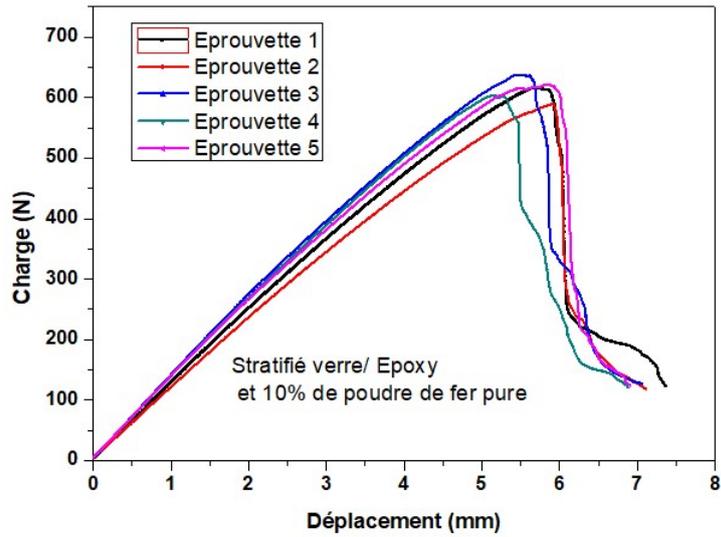


Figure (III-5) : courbe d'évolution charge déplacement St [10%]

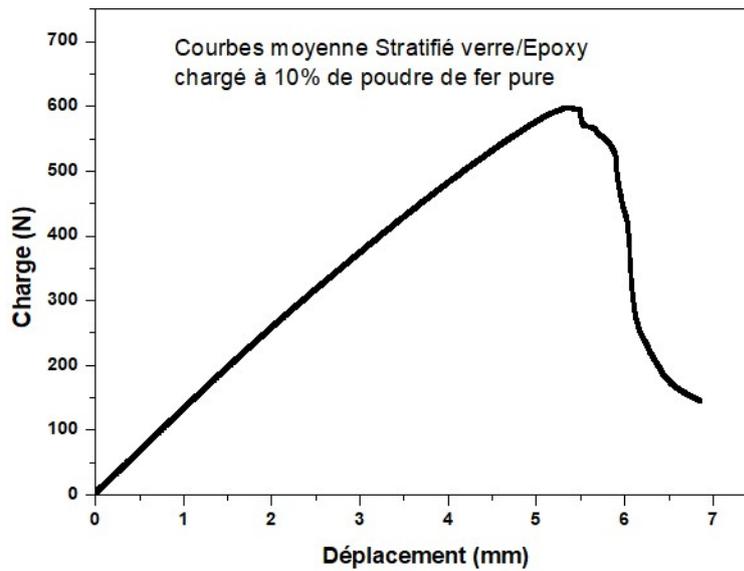


Figure (III-6) : Courbe d'évolution moyenne charge déplacement St [10%]

## Etude expérimental

Tableau (III.4) : Résultats des essais statique d'éprouvette à 10% de poudre de fer

N° EP	$E_{mod}$ (Gpa)	F pour déformation plastique à 0,2% (N)	$F_{max}$ (N)	dL pour $F_{max}$ (mm)	$F_{Rupt}$ (N)	dL à rupture (mm)	W jusqu'à $F_{max}$ (Nmm)	W à rupture (Nmm)	$a_0$	$b_0$
EP 1	8,480	534,545	616,104	5,73642	123,133	7,36282	1957,374	2396,925	4	15
EP 2	8,027	487,627	589,561	5,91887	117,892	7,11496	1941,430	2203,937	4	15
EP 3	9,419	503,491	637,120	5,48527	127,391	7,05690	1932,768	2417,003	4	15
EP 4	9,234	513,218	604,099	5,15681	120,713	6,88680	1700,352	2215,488	4	15
EP 5	9,301	447,601	621,733	5,86031	124,262	6,91043	2102,179	2403,231	4	15

Tableau (III.5) : Statistiques des essais statique d'éprouvette à 10% de poudre de fer

	$E_{mod}$ (Gpa)	F pour déformation plastique à 0,2% (N)	$F_{max}$ (N)	dL pour $F_{max}$ (mm)	$F_{Rupt}$ (N)	dL à rupture (mm)	W jusqu'à $F_{max}$ (Nmm)	W à rupture (Nmm)	$a_0$	$b_0$
X	8,892	497,297	613,723	5,631	122,678	7,066	1926,821	2327,317	4	15
S	0,608	32,567	17,983	0,313	3,595	0,191	144,2400	107,680	4	15
v	6,841	6,548	2,930	5,563	2,930	2,711	7,485	4,626	4	15

X : moyenne arithmétique

S : écart-type

v : Variance

### 2. STRATIFIE A 15% DE CHARGE POUUDRE DE FER PUR

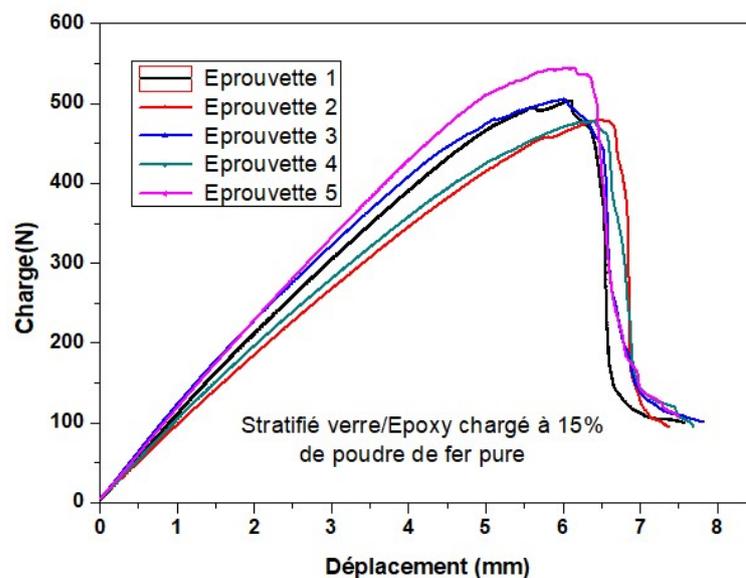
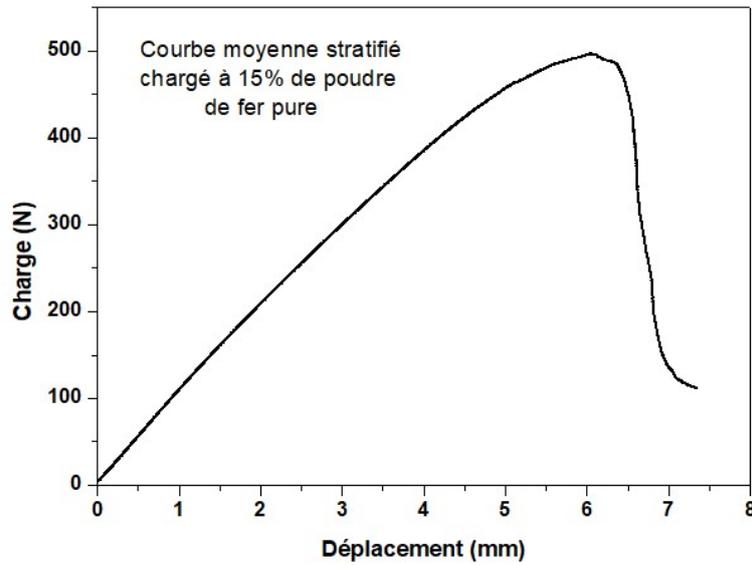


Figure (III-7) : courbe d'évolution charge déplacement St [15%]

## Etude expérimental



**Figure (III-8) : Courbe dévolution moyenne charge déplacement St [15%]**

**Tableau (III.6) : Résultats des essais statique d'éprouvette à 15% de poudre de fer**

N° EP	$E_{mod}$ (Gpa)	F pour déformation plastique à 0,2% (N)	$F_{max}$ (N)	dL pour $F_{max}$ (mm)	$F_{Rupt}$ (N)	dL à rupture (mm)	W jusqu'à $F_{max}$ (Nmm)	W à rupture (Nmm)	$a_0$	$b_0$
EP 1	7,206	395,720	503,691	6,10162	100,652	7,5570	1800,215	2123,932	4	15
EP 2	6,499	320,194	479,219	6,51038	95,838	7,37357	1794,167	2007,179	4	15
EP 3	8,280	310,332	505,413	6,01014	101,069	7,81711	1825,874	2275,032	4	15
EP 4	6,731	334,784	477,996	6,40545	95,572	7,68710	1800,760	2086,213	4	15
EP 5	7,762	461,117	544,275	6,04848	108,854	7,48712	1928,588	2342,958	4	15

**Tableau (III.7) : Statistiques des essais statique d'éprouvette à 15% de poudre de fer**

	$E_{mod}$ (Gpa)	F pour déformation plastique à 0,2% (N)	$F_{max}$ (N)	dL pour $F_{max}$ (mm)	$F_{Rupt}$ (N)	dL à rupture (mm)	W jusqu'à $F_{max}$ (Nmm)	W à rupture (Nmm)	$a_0$	$b_0$
X	7,296	364,429	502,119	6,215	100,397	7,584	1829,921	2167,063	4	15
S	0,732	63,422	28,798	0,226	5,387	0,172	56,485	138,343	4	15
v	10,041	17,403	5,735	3,651	5,366	2,277	3,086	6,383	4	15

## Etude expérimental

### 3. STRATIFIE A 25% DE CHARGE POUDRE DE FER PUR

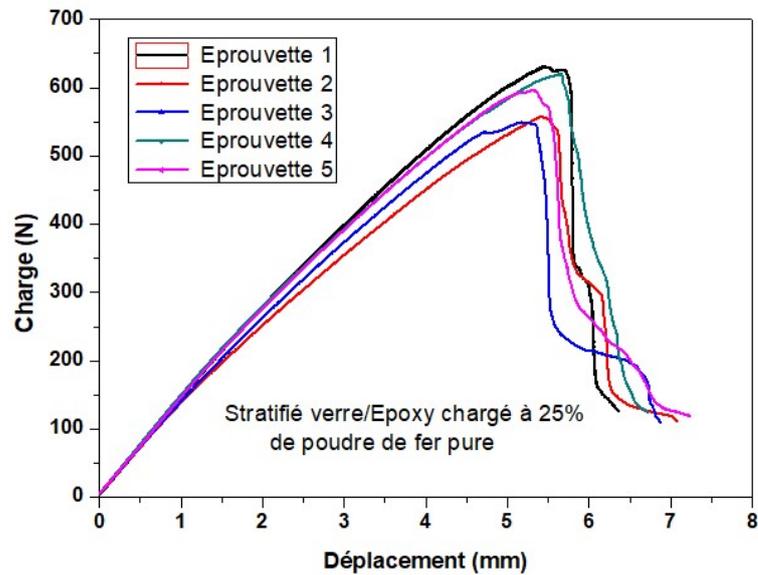


Figure (III-9) : courbe d'évolution charge déplacement St [25%]

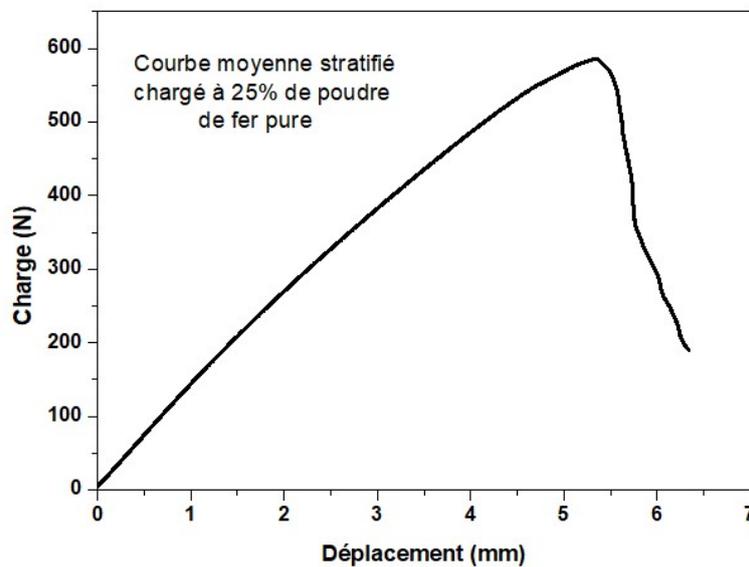


Figure (III-10) : Courbe d'évolution moyenne charge déplacement St [25%]

## Etude expérimental

Tableau (III.8) : Résultats des essais statique d'éprouvette à 25% de poudre de fer

N° EP	E <sub>mod</sub> (Gpa)	F pour déformation plastique à 0,2% (N)	F <sub>max</sub> (N)	dL pour F <sub>max</sub> (mm)	F <sub>Rupt</sub> (N)	dL à rupture (mm)	W jusqu'à F <sub>max</sub> (Nmm)	W à rupture (Nmm)	a <sub>0</sub>	b <sub>0</sub>
EP 1	9,794	450,502	631,349	5,45023	126,223	6,35498	1923,870	2264,717	4	15
EP 2	9,381	315,154	557,777	5,42536	111,447	7,07347	1701,213	2125,309	4	15
EP 3	9,387	385,103	548,940	5,17195	109,759	6,87210	1628,950	2079,766	4	15
EP 4	10,004	391,420	619,970	5,65044	123,812	6,71856	2014,217	2362,668	4	15
EP 5	9,560	443,043	595,676	5,31375	119,112	7,23717	1799,243	2312,497	4	15

Tableau (III.9) : Statistiques des essais statique d'éprouvette à 25% de poudre de fer

	E <sub>mod</sub> (Gpa)	F pour déformation plastique à 0,2% (N)	F <sub>max</sub> (N)	dL pour F <sub>max</sub> (mm)	F <sub>Rupt</sub> (N)	dL à rupture (mm)	W jusqu'à F <sub>max</sub> (Nmm)	W à rupture (Nmm)	a <sub>0</sub>	b <sub>0</sub>
X	9,625	397,044	590,742	5,402	118,071	6,851	1813,499	2228,991	4	15
S	0,270	54,437	36,611	0,176	7,305	0,340	157,590	121,590	4	15
v	2,809	13,710	6,197	3,276	6,187	4,963	8,689	5,454	4	15

Nous avons utilisé l'équation (III.1) et (III.2) pour calculer les caractéristiques mécaniques de chaque matériau

$$\sigma_f = \frac{3Fl}{2bh^2} \text{(III.1)}$$

$$E_f = \frac{l^2}{4bh^2} \frac{\Delta F}{\Delta \delta} \text{(III.2)}$$

Où :

F : la charge de rupture applique [N]

l : longueur entre appui [mm]

b : largeur de l'éprouvette [mm]

h : L'épaisseur [mm]

$\Delta F$ :Variation de la force sur la partie rectiligne de la courbe charge-déplacement.

$\Delta \delta$ :Variation de la fléché en mm, correspondante a la variation de la force.

## Etude expérimental

Tableau (III.10) : les valeurs des  $\Delta F$  et  $\Delta \delta$  et leur taux de variation  $\frac{\Delta F}{\Delta \delta}$  St [10%]

épreuve	$(\delta_2, F_2)$ $(\delta_1, F_1)$	$\frac{\Delta F}{\Delta \delta} = \frac{F_2 - F_1}{\delta_2 - \delta_1}$
EP 1	(0,02438788, 7,96129322) (0,01724677, 7,08385181)	122,871795
EP 2	(0,02385448, 7,57919455) (0,017812, 6,92489767)	108,282828
EP 3	(0,02470297, 8,2726078) (0,01768392, 7,42348719)	120,973845
EP 4	(0,02589609, 8,48066139) (0,01857187, 7,4992156)	134,000065
EP 5	(0,02465604, 8,46809769) (0,01772855, 7,57747316)	128,563808

Tableau (III.11) : les valeurs des  $\Delta F$  et  $\Delta \delta$  et leur taux de variation  $\frac{\Delta F}{\Delta \delta}$  St [15%]

épreuve	$(\delta_2, F_2)$ $(\delta_1, F_1)$	$\frac{\Delta F}{\Delta \delta} = \frac{F_2 - F_1}{\delta_2 - \delta_1}$
EP 1	(0,02364835, 7,5683856) (0,01742276, 6,93166685)	102,27451
EP 2	(0,02460896, 7,22449446) (0,01777303, 6,59217024)	92,5
EP 3	(0,02381276, 7,79365587) (0,01743458, 7,09834337)	109,014354
EP 4	(0,02379939, 7,55675602) (0,01763484, 6,95128727)	98,2178218
EP 5	(0,02364035, 7,64543724) (0,01738424, 6,97063255)	107,863415

Tableau (III.12) : les valeurs des  $\Delta F$  et  $\Delta \delta$  et leur taux de variation  $\frac{\Delta F}{\Delta \delta}$  St [25%]

épreuve	$(\delta_2, F_2)$ $(\delta_1, F_1)$	$\frac{\Delta F}{\Delta \delta} = \frac{F_2 - F_1}{\delta_2 - \delta_1}$
EP 1	(0,02390212, 8,40551949) (0,01868361, 7,68481636)	138,105263
EP 2	(0,02478709, 8,22706985) (0,01764597, 7,34767532)	123,145299
EP 3	(0,02486048, 8,57252884) (0,01842127, 7,68776321)	137,402844
EP 4	(0,02477701, 8,66051674) (0,01760538, 7,59508753)	148,561636
EP 5	(0,02270995, 8,26819134) (0,01758299, 7,56018305)	138,095331

## Etude expérimental

Les résultats de calcul sont présentés dans les tableaux (III.13), (III.14) et (III.15)

Tableau (III.13) : résultat de contrainte et module de flexion St [10%]

épreuve	$F_{max}$ [N]	$\sigma_f$ [MPa]	$\sigma_{f moy}$ [MPa]	$E_f$ [MPa]	$E_{f moy}$ [MPa]
Ep 1	616,104	246,44	245,48	524,24	531,33
Ep 2	589,561	235,82		496,003	
Ep3	637,120	254,84		516,15	
Ep 4	604,099	241,63		571,73	
Ep 5	621,733	248,69		548,53	

Tableau (III.14) : résultat de contrainte et module de flexion St [15%]

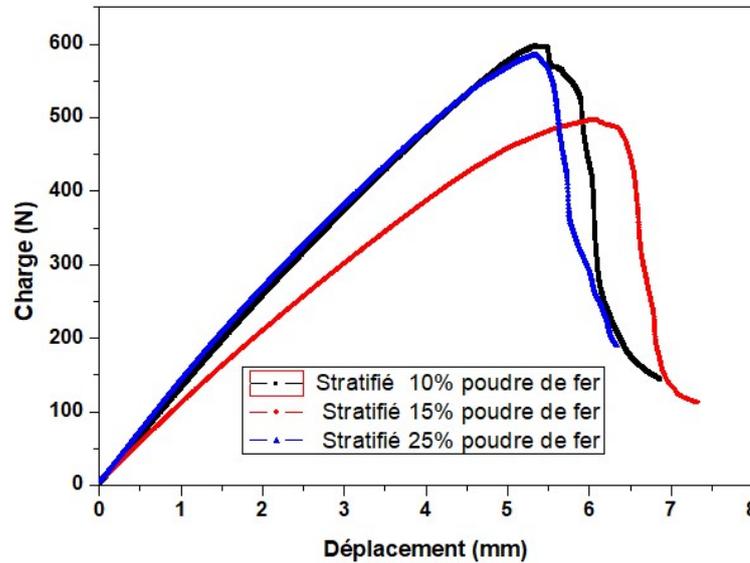
épreuve	$F_{max}$ [N]	$\sigma_f$ [MPa]	$\sigma_{f moy}$ [MPa]	$E_f$ [MPa]	$E_{f moy}$ [MPa]
Ep 1	503,691	201,47	200,84	436,36	435,07
Ep 2	479,219	191,68		394,66	
Ep3	505,413	202,16		465,12	
Ep 4	477,996	191,19		419,05	
Ep 5	544,275	217,71		460,20	

Tableau (III.15) : résultat de contrainte et module de flexion St [25%]

épreuve	$F_{max}$ [N]	$\sigma_f$ [MPa]	$\sigma_{f moy}$ [MPa]	$E_f$ [MPa]	$E_{f moy}$ [MPa]
Ep 1	631,346	252,53	236,29	589,24	584,79
Ep 2	557,777	223,11		525,41	
Ep3	548,940	219,57		586,24	
Ep 4	619,970	247,98		633,86	
Ep 5	595,676	238,27		589,20	

### 4. Comparaison de résultats :

Pour comparer les résultats de l'étude expérimentale, les courbes moyennes d'évolution charges/déplacements ont été tracées comme indiqué sur la figure (III-11)



**Figure (III-11) : Comparaison des courbes moyennes de l'évolution charge déplacement des stratifiés St [10%], [15%] et [25%]**

### III.2.3 Interprétation

Les trois figures (III.5, III.7 et III.9) montrent le comportement mécanique charge déplacement des trois types de stratifiés étudiés. En comparons les courbes moyennes des trois stratifiés, on note une légère différence dans l'aspect des courbes pour les deux stratifiés St[10%) et St[25%) tandis que pour le stratifié St[15%), on remarque que sa dispersion par rapport aux deux autre est conséquente. En générale, le comportement (effort/déplacement) de tous les éprouvettes lors de la flexion statique (chargements monotones) est représenté par des courbes ayant la même allure et composées de trois phases principales : évolution proportionnelle linéaire de la charge en fonction du déplacement, suivie d'un comportement non linéaire jusqu'à la charge maximale. Finalement on assiste à une diminution de cette dernière jusqu'à la rupture de l'éprouvette. La rupture finale n'est obtenue qu'après une baisse soudaine de la charge en raison de la coalescence des macro fissures qui conduisent directement à la ruine des éprouvettes. La raideur de la pente des courbes de comportement est observée pour les trois matériaux, une différence du point de vu rigidité et du module d'élasticité en flexion entre les stratifiés St[10%) et St[25%) qui sont presque similaire tandis la rigidité du stratifié St[15%) est moindre, générant en même temps une dispersion des

## Etude expérimental

contraintes. Lorsque l'on compare les courbes de comportement moyennes (Figure III.11), il apparaît que la rigidité des stratifiés St[10%] et St[25%] est supérieure par rapport à celle du stratifié St[15%].

Du point de vue contrainte de flexion et module d'élasticité en flexion calculés, on remarque que l'augmentation de la teneur de poudre de fer pur dans la proportion 10% et 15% génère une diminution de la contrainte de flexion et du module d'élasticité, par conséquent l'augmentation de la teneur de poudre de fer pur dans la proportion 15% exclu et 25%, entraîne une légère augmentation de la contrainte de flexion est une augmentation considérable du module de Young.

On peut également remarquer que le stratifié St[25%] est plus résistante à la rupture à cause de la teneur élevée de poudre de fer.

### III.3. Etude de l'endommagement :

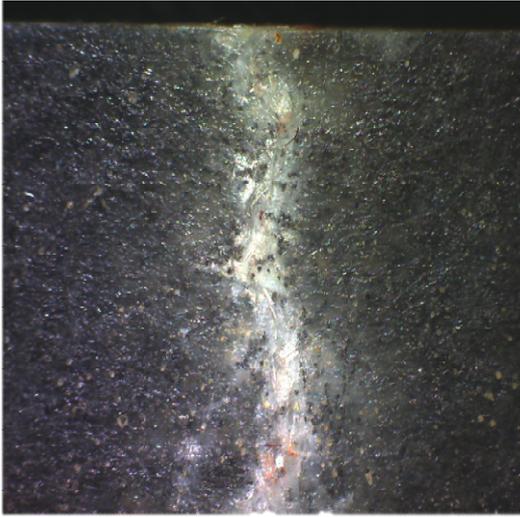
Les faciès de rupture des éprouvettes testées ont été observés par microscope optique (figure III.12) pour étudier les mécanismes d'endommagement. Ces observations montrent que la propagation de la fissure se produit dans la matrice entre les plis de ces stratifiés composites avec un délaminage dans les interfaces matrice grain de poudre de fer. Le mécanisme de rupture de ces matériaux se caractérise généralement par propagation des fissures de la matrice. Les figures (Figure III.13, III.14 et III.15) présentent les images de la propagation des fissures dans les sections longitudinales comprimées et tendues ainsi que dans les sections transversales. Le mécanisme de rupture de ces matériaux se caractérise par une rupture nette de la matrice et un délaminage matrice grains de poudre de fer.



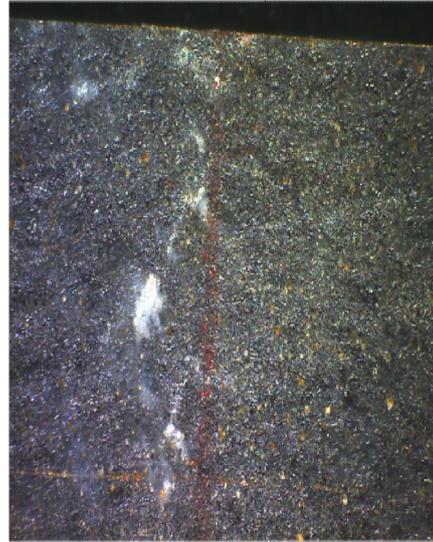
Figure (III-12) : microscope optique

## Etude expérimental

---



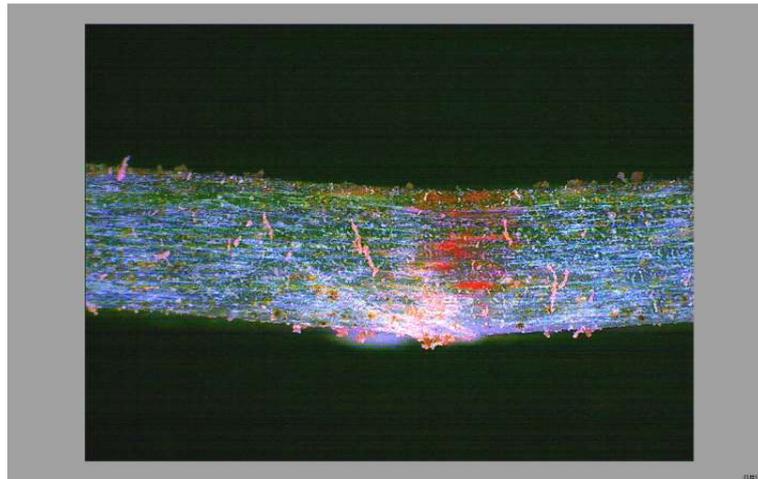
a) Vue longitudinal face tendue



b) Vue longitudinal face comprimée

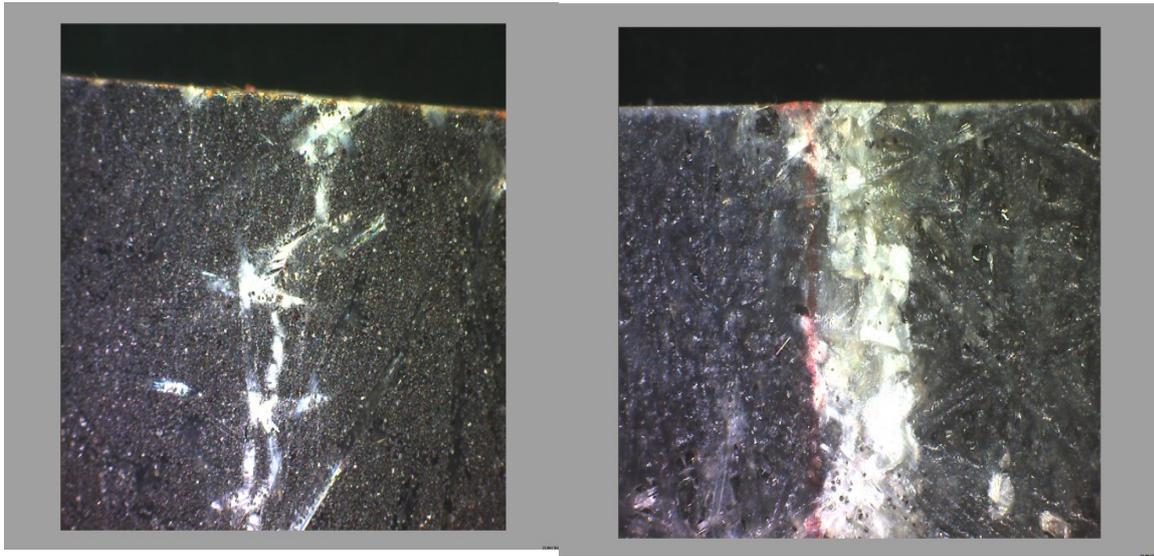
Super Admin  
Badri  
Ep10-T  
Shift Number

11:58:58 23/5/2023



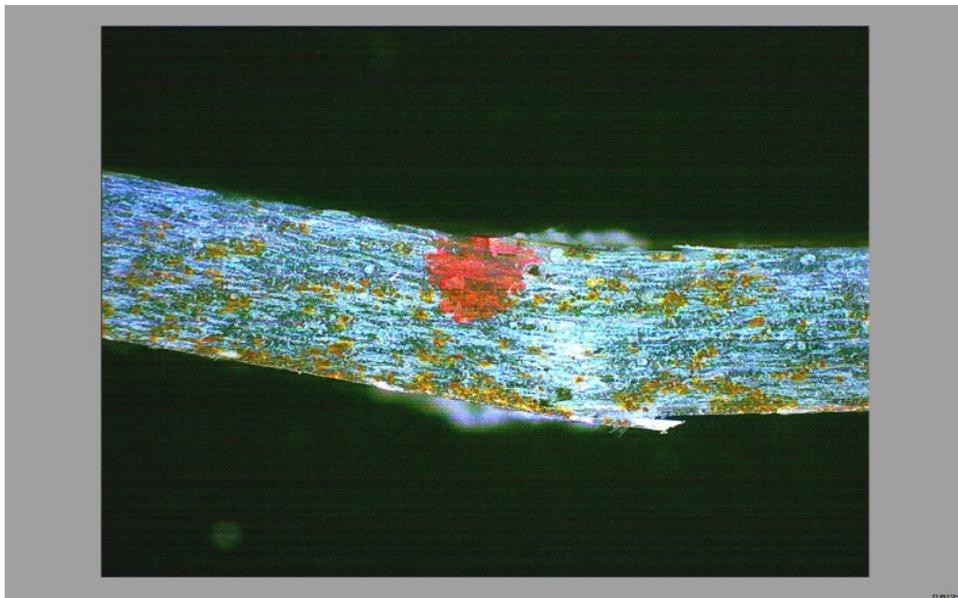
c) Vue transversal

**Figure (III-13) : Les faciès de rupture dans le stratifié [10%]**



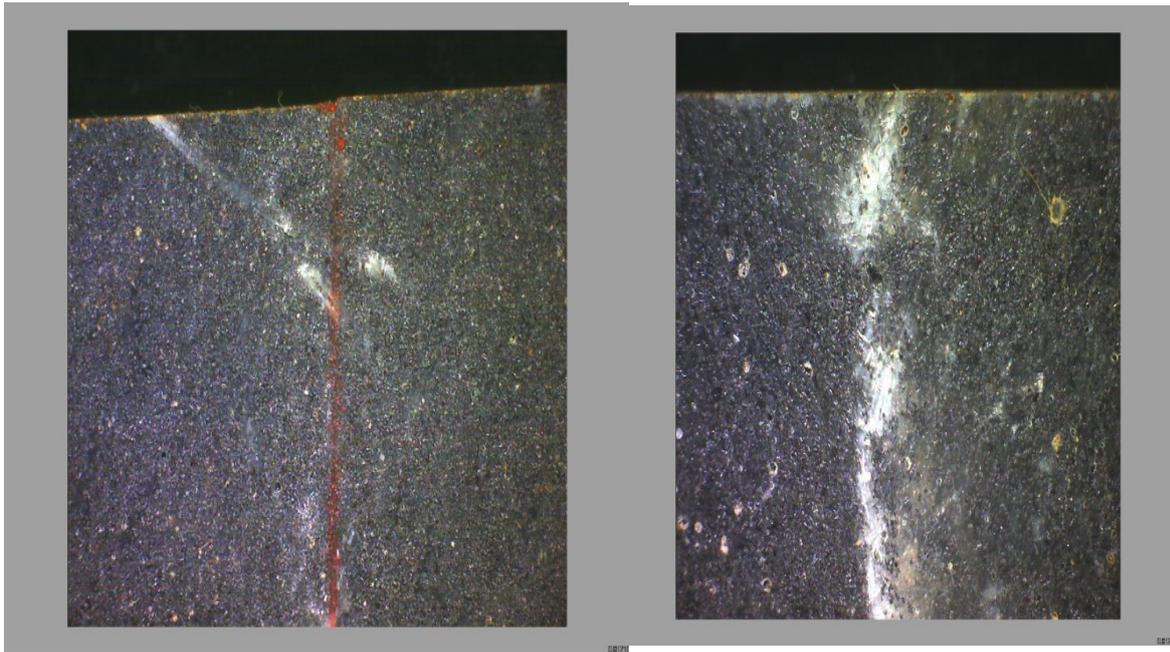
a) Vue longitudinal

b) Vue longitudinal à traction



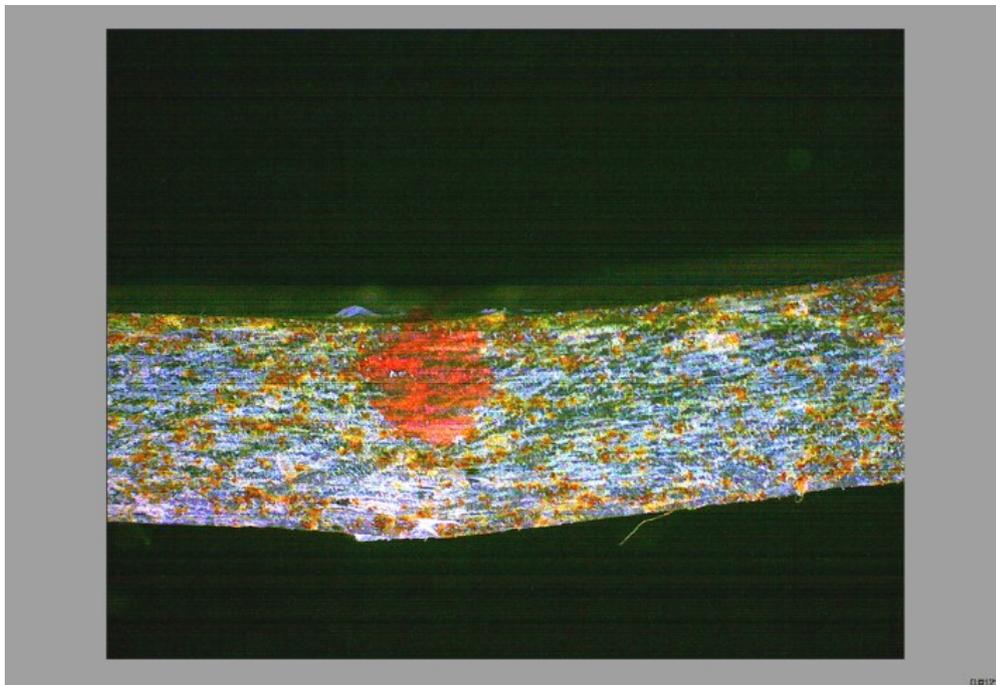
c) Vue transversal

**Figure (III-14) : Les faciès de rupture dans le stratifié [15%]**



a) Vue longitudinal à compression

b) Vue longitudinal à traction



c) Vue transversal

**Figure (III-15) : Les faciès de rupture dans le stratifié [25%]**

# **Conclusion générale**

Notre travail consiste en l'étude d'un matériau composite stratifié pré-imprégné composé de quatre couches de mat de fibre de verre (E) et une résine époxy chargé de poudre de fer pur. A cet effet, trois types d'éprouvettes différenciés par la teneur massique de la poudre de fer (10%, 15% et 25%) ont été élaborés au laboratoire et leur découpe a été réalisée selon la norme ISO 14125. Des essais de flexion (charge monotone) 3 points statique destinées à l'étude des caractéristiques mécaniques du matériau.

Cette étude expérimentale nous a permis d'une part, de tracer les courbes charge/déplacement pour cinq éprouvettes de chaque type. Ces courbes obtenues ont la même allure et se composent de trois phases principales : évolution proportionnelle linéaire de la charge en fonction du déplacement, suivie d'un comportement non linéaire jusqu'à la charge maximale. Finalement on assiste à une diminution de cette dernière jusqu'à la rupture de l'éprouvette. d'autres part, l'interprétation des résultats obtenus a révélée que la rigidité en flexion du stratifié St[25%] est plus importante que celles des deux autres. de déterminer les caractéristiques mécaniques du matériau (contrainte maximale à la rupture et module d'élasticité en flexion).

Du point de vu contrainte de flexion et module d'élasticité en flexion calculés, on dénote dans un premier lieu que lorsque on augmente la teneur des charges dans le premier intervalle (10% -15%) une diminution de la contrainte de flexion et du module d'élasticité, dans un second lieu l'augmentation de la teneur des charges dans le deuxième intervalle (15% -25%) entraîne une augmentation de la contrainte de flexion et du module d'élasticité.

Enfin, l'observation des faciès de rupture, a mis en évidence la nature de leur endommagement et qui a fait ressortir une fissuration accompagnée de rupture de la matrice avec un délaminage dans les interfaces grains de poudre de fer/matrice.

### **Références bibliographiques**

- [1] Jean Marie. Berthelot, Matériaux composites « comportement mécanique et analyse des Structures », édition TEC et DOC, 1999.
- [2] V.Pauchard, H.Boulharts, F.Grosjeani, P.Odru, A.Chateau Minois, « Développement d'un modèle de durabilité de poutres composites unidirectionnelles renforcées par des fibres de verre », Rev, IFP, Vol.56, No.6, pp.581-595, 2001.
- [3] A.BOUDENNE, "Etude expérimentale et théorique des propriétés thermophysiques d'matériaux composites à matrice polymère," Université PARIS XII, 2003.
- [4] CARMA « Glossaire des matériaux composites » Actualisation octobre 2006.
- [5] P. BARDONNET, "Résines époxydes (EP)," Techniques de l'Ingénieur, vol. A346.
- [6] Nadia Behlouli, « les matériaux composites », cours des matériaux composites, Université de Strasbourg.
- [7] JoelCugnoni, « Identification par recalage modal et fréquentiel des propriétés constitutives de coques en matériaux composites », Thèse, Ecole Polytechnique fédérale de Lausanne, 2005.
- [8] GURIT, «Guide to Composites,» 1 Janvier 2013. <http://www.gurit.com/guide-to-composites.aspx>. [Accès le 1 Novembre 2013].

## *Références bibliographiques*

---

- [9] L. Berreur, B. d. Maillard, and S. Nösperger, "L'industrie française des matériaux.
- [10] Abderrazak Bezazi, « Etude théorique et expérimentale du comportement mécanique en statique et en fatigue des matériaux composites stratifiés et sandwiches en flexion 3 points », Thèse de doctorat, Construction Mécanique, Université Annaba, 2003.
- [11] J.Molimard, « Cours de mécanique expérimentale », Ecole nationale supérieure des mines de Saint-Étienne, 2005.